

Technische Universität München

Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Flexibles Energiemanagement für hybride Nutzfahrzeuge

Dipl.-Ing. Claudia Meis

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

2. Univ.-Prof. Dr.-phil. Gernot Spiegelberg

Die Dissertation wurde am 12.11.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 07.04.2016 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Assistentin am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München. Ich bedanke mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp dafür, dass er mich am Lehrstuhl aufgenommen und hervorragende Rahmenbedingungen geschaffen hat, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Neben der Forschung hatte ich zudem die Gelegenheit, eine Vorlesung aufzubauen und zu halten sowie als Gruppenleiterin zu arbeiten. Ich danke ihm für diese Möglichkeiten, die mir sehr viel Freude bereitet haben.

Mein Dank gilt ebenfalls meinem zweiten Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Gernot Spiegelberg, mit dem ich zahlreiche fachliche Diskussionen geführt habe, die erheblich zu der Arbeit beigetragen haben. Durch das von ihm initiierte Forschungsprojekt mit der Siemens AG konnte ich Daten für meine Arbeit generieren. Er stellte für mich auch Kontakt zu einem weiteren Forschungsprojekt bei Siemens her, in dem ich Messungen am ENUBA Lkw mit Unterstützung weiterer Siemens-Mitarbeiter durchführen konnte, denen ich hiermit auch danken möchte. Neben der Siemens AG haben mir auch die Daimler AG und die Akasol GmbH freundlicherweise Daten zur Verfügung gestellt.

Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister danke ich für den Prüfungsvorsitz.

Für die sehr schöne Zeit am Lehrstuhl bedanke ich mich herzlich bei meinen ehemaligen Kollegen. Während der Zeit sind einige sehr gute Freundschaften entstanden, für die ich dankbar bin. Ich hatte wirklich viel Spaß mit euch!

Auch bei meiner Familie möchte ich mich herzlich für die Unterstützung auf meinem ganzen Weg zur Promotion bedanken. Insbesondere bei meinem Mann, Jan-Fabian, der immer für mich da war und ist.

Garching, im April 2016

Claudia Meis

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.1.1	Betriebskostenreduktion als Ziel des Energiemanagements	2
1.1.2	Fahrzeugvarianz in der Nutzfahrzeugbranche	3
2	Stand der Wissenschaft: Energiemanagement für Hybridfahrzeuge	8
2.1	Freiheitsgrade und Betriebsmodi in Hybridfahrzeugen	8
2.2	Aufgaben des Energiemanagements	10
2.3	Energiemanagementverfahren	12
2.3.1	Optimalsteuerung	12
2.3.2	Modellprädiktive Regelung	15
2.3.3	Äquivalenzwertverfahren	16
2.3.4	Regelbasierte Verfahren	18
2.3.5	Fuzzy Logik	19
2.3.6	Ableitung von regelbasierten Strategien mit Optimierungsverfahren	20
2.3.7	Marktbasierte Verfahren	22
2.4	Gegenüberstellung der Energiemanagementverfahren	25
3	Vorgehen und wissenschaftliche Fragestellung der Arbeit	29
4	Anforderungen an ein flexibles Energiemanagementverfahren für Nutzfahrzeuge	32
5	Gestaltung des flexiblen Energiemanagements	34
5.1	Aufbau des Energiemanagementsystems	34
5.1.1	Zwei-Ebenen-Prinzip	34
5.1.2	Entscheidungslogik	35
5.1.3	Hierarchisches Energiemanagement	39
5.2	Kosten-Leistungs-Funktionen der Energiekomponenten	40
5.2.1	Grundlegende Gestaltung der Kosten-Leistungs-Funktionen	41
5.2.2	Energiekomponenten als Quellen	43
5.2.3	Energiekomponenten als Senken	53
5.2.4	Speicher als Quelle und Senke	62
6	Hybridfahrzeugsimulationsmodell	66
6.1	Modellierung eines modularen Hybridfahrzeugs	66
6.2	Energiekomponentenmodell	68

6.2.1	Motor-Generator-Einheit	68
6.2.2	Externes Netz und Nebenverbraucher	69
6.2.3	Traktion	70
6.2.4	Ultracap-System	73
6.2.5	Lithium-Ionen Batterie.....	73
6.3	Parametrierung der Energiekomponentenmodelle	75
6.3.1	Motor-Generator-Einheit	75
6.3.2	Externes Netz und Nebenverbraucher	76
6.3.3	Traktion	76
6.3.4	Ultracap	79
6.3.5	Lithium-Ionen Batterie.....	80
6.4	Verifizierung der Energiekomponentenmodelle des Referenzfahrzeugs	81
6.4.1	Verifikation des Modells der Motor-Generator-Einheit.....	81
6.4.2	Verifikation des Traktionsmodells	82
6.4.3	Verifikation des Ultracapmodells.....	83
7	Ergebnisse zur Leistungsverteilung und den Betriebskosten beim flexiblen Energiemanagement	84
7.1	Vergleich der Leistungsverteilung und der Betriebskosten vom flexiblen Energiemanagement und regelbasierten Energiemanagement beim ENUBA Lkw	84
7.2	Leistungsverteilung und Betriebskosten beim flexiblen Energiemanagement bei einer Fahrzeugvariante mit Batterie	90
7.3	Leistungsverteilung und Betriebskosten beim flexiblen Energiemanagement bei einer Fahrzeugvariante mit Oberleitung	92
8	Diskussion der Anforderungserfüllung des flexiblen Energiemanagements	95
8.1	Hauptanforderungen	95
8.1.1	Flexibilität	95
8.1.2	Betriebskostenminimierung.....	96
8.1.3	Zusammenfassung der Diskussion zu den Hauptanforderungen	98
8.2	Anforderungen auf Gesamtfahrzeugebene.....	99
8.2.1	Energiebilanz sicherstellen	99
8.2.2	Umgang mit mehreren Energieknotenpunkten.....	100
8.2.3	Geringer Datenaustausch	100
8.2.4	Geringer Rechenaufwand.....	101
8.2.5	Zusammenfassung der Diskussion zu den Anforderungen auf Gesamtfahrzeugebene	101
8.3	Anforderungen auf Komponentenebene.....	102

8.3.1	Betriebsgrenzen berücksichtigen	102
8.3.2	Sicherheitskritische Verbraucher versorgen.....	102
8.3.3	Fahrervorgaben umsetzen.....	102
8.3.4	Dynamische Berechnung und minimaler Rechenaufwand	103
8.3.5	Zusammenfassung der Diskussion zu den Anforderungen auf Komponentenebene	103
9	Zusammenfassung und Ausblick	104
	Abbildungsverzeichnis.....	cvii
	Tabellenverzeichnis.....	cxii
	Verwendete Formelzeichen	cxii
	Literaturverzeichnis.....	cxvii
	Verzeichnis studentischer Arbeiten	cxxxiii
	Verzeichnis eigener Veröffentlichungen	cxxxiv
	Anhang	cxxxv

1 Einleitung

Der Personen- und Güterverkehr soll in Deutschland mittelfristig und langfristig deutlich ansteigen [Ick07, S. 4], [Rad13, S. 338–341]. Das wachsende Verkehrsaufkommen führt unweigerlich zu einem erhöhten Bedarf an Antriebsenergie, die derzeit hauptsächlich durch die Verbrennung von rohölbasiertem Kraftstoff bereitgestellt wird. Das verursacht vor allem durch den Ausstoß von klimaschädigenden CO₂- und weiterer Schadstoffemissionen Umweltprobleme. Zudem führt der ansteigende Rohölverbrauch mit der Abnahme der Erschließung weiterer Ölfelder zu einem Anstieg des Ölpreises, der zu steigenden Preisen für den Güterverkehr führen wird [Grü12, S. 2].

1.1 Motivation

Zur langfristigen Sicherung der Mobilität sind energieeffiziente elektrische Antriebe in Hybrid- und Elektrofahrzeugen erforderlich, weil diese große Potenziale zur Verringerung der Abhängigkeit von Erdöl als Energieträger besitzen [Die09, S. 3]. Das wird dadurch erreicht, indem die im (teil-) elektrischen Antrieb verwendete elektrische Energie über erneuerbare Energien hergestellt wird [Küh10, S. 4510].

Zudem liegt das Potenzial der Elektromobilität insbesondere im Klimaschutz durch die Verringerungen der CO₂-Emissionen im Verkehrssektor und in den Verringerungen von lokalen Emissionen in Innenstädten und Ballungsgebieten [Die09, S. 8]. Da Nutzfahrzeuge derzeit 26% der CO₂-Emissionen im Straßenverkehr in der EU verursachen [Hil11, S. 171], ist durch die Elektrifizierung der Antriebsstränge in Kombination mit einem Energiemanagement ein großes Potenzial hinsichtlich Emissionseinsparungen zu verzeichnen [Kha10, S. 147].

Die meisten EU-Länder versuchen, die CO₂-Emissionen von Fahrzeugen durch gezielte Steuerungen und Vorschriften zu verringern [Hil11, S. 8]. Das hat Fahrzeughersteller dazu angetrieben, Technologien, wie Hybrid- und Elektroantriebe, die Emissionen verringern weiterzuentwickeln und einzusetzen [Kha10, S. 147], [Kes07, S. 35], [Laj14b, S. 1]. Allerdings gibt es in der EU noch keine standardisierten Verfahren, um den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen eines Nutzfahrzeuges zu messen [Eur14, S. 2]. Bisher werden nur Grenzwerte für die Emissionen der Verbrennungsmotoren der Nutzfahrzeuge auf dem Motorenprüfstand vorgeschrieben [Hil11, S. 10]. In Japan, den USA, Kanada und China gibt es bereits standardisierte Verfahren zur Messung der Emissionen des Gesamtfahrzeugs. Solche Verfahren werden derzeit auch in der EU diskutiert und sollen in Zukunft eingeführt werden, um eine bessere Vergleichbarkeit zu schaffen [Eur14, S. 2]. In einer Studie von Roland Berger wird davon ausgegangen, dass spätestens im Jahr 2020 in der EU CO₂-Reduktionen von 30% für Lkw vom Gesetzgeber vorgeschrieben werden [Dre12, S. 12]. Voraussichtlich werden für Nutzfahrzeuge Emissionsziele vorgegeben, die mit konventioneller Antriebstechnik allein kaum zu erreichen sind, sodass die Elektrifizierung auch im Nutzfahrzeugbereich zwingend erscheint [Hoe13, S. 508], [Dre12, S. 12].

Bei Hybridfahrzeugen ist ein Energiemanagement nötig, weil ein oder mehrere Freiheitsgrade im Fahrzeug vorliegen [Kle03, S. 1], [Ser09a, S. 78]. Die Freiheitsgrade sind dadurch gekennzeichnet, dass die benötigte Energie im Fahrzeug durch mehrere Komponenten bereitgestellt bzw. aufgenommen werden kann. Wegen des großen Einflusses der daraus resultiert, wird ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf in Deutschland entspre-

chend des Entwicklungsplans Elektromobilität explizit für das Energiemanagement gesehen [Die09, S. 21].

1.1.1 Betriebskostenreduktion als Ziel des Energiemanagements

Nutzfahrzeuge stellen im Vergleich zu Personenkraftwagen eine Investition dar, mit der finanzieller Nutzen erwirtschaftet werden muss [Ese14, S. 121–122]. Daher sind sowohl derzeit als auch in Zukunft in allen Ländern und Kundensegmenten die Anschaffungs- und Betriebskosten die wesentlichen Entscheidungsfaktoren beim Kauf eines neuen Fahrzeugs [Kel08, S. 4], [Ian14, S. 302]. Da das Energiemanagement bei Hybridfahrzeugen wesentlich die Betriebskosten bestimmt [Kha10, S. 147], muss es für Nutzfahrzeuge so entwickelt werden, dass es die Betriebskosten minimiert, die es beeinflussen kann. Diese sind der Kraftstoffverbrauch, die Lebensdauer der Komponenten, die Emissionen des Fahrzeugs und die Stromkosten bei Plug-in-Hybriden [Laj12a, S. 1], [Kop08, S. 15], [Ser08, S. 4498].

Die Kraftstoffkosten haben einen wesentlichen Anteil an den Betriebskosten [Nyl12, S. 35]. Sie machen im Straßengüterverkehr derzeit zwischen 25% und 70% der Kraftfahrzeughalterkosten aus [Hoe13, S. 502]. Bei der Aufteilung der Betriebskosten bei einem konventionell angetriebenen Lkw fällt auf, dass zusammen mit den Fahrerkosten die Betriebsmittel wie Kraftstoff und Schmierstoffe, die aus Rohöl produziert werden, die größten Anteile darstellen (Abbildung 1.1) [Wit11, S. 33].

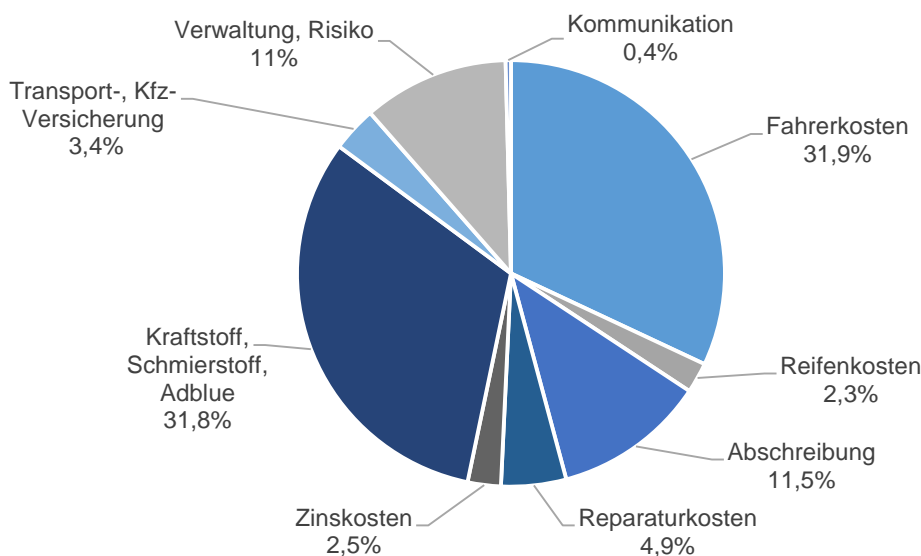


Abbildung 1.1: Betriebskostenstruktur eines 40t Lkw mit Emissionsklasse Euro 5 ohne Maut [Wit12, S. 118]

Der Vergleich des Kraftstoffverbrauchs mit den Wettbewerbern ist ein Hauptgrund des steigenden Interesses von Fahrzeugherstellern an Hybridfahrzeugen [Laj14b, S. 1], [Kha10, S. 147]. Wie in vielen Studien gezeigt wurde, können mit hybriden Antriebssträngen Kraftstoffvorteile gegenüber konventionell angetriebenen Antriebssträngen erreicht werden [van10, S. 6579], [Ser08, S. 4498], [Kes07, S. 35]. Diese Kraftstoffeinsparungen können aufgrund der Rekuperation der Bremsenergie erzielt werden [Sci07, S. 60], [Kha10, S. 149–150], [Ebb12, S. 1], [Küh10, S. 4510], [Ade09, S. 99]. Bei der Rekuperation wirkt die elektrische Traktionsmaschine als Generator und wandelt mechanische Energie in elektrische [Rei12, S. 93]. Diese Energie kann gespeichert und später genutzt werden [Sci07, S. 60]. Das Potenzial, kinetische und potenzielle Energie

durch rekuperatives Bremsen zurück zu gewinnen, ist insbesondere durch das hohe Gewicht von Nutzfahrzeugen erheblich [Ser08, S. 4498]. Zudem kann Kraftstoff eingespart werden, indem der Verbrennungsmotor im Leerlauf oder bei Teillast komplett abgeschaltet wird [Sci07, S. 60], [Ade09, S. 99], [Küh10, S. 4510], [Kha10, S. 149–150]. Dann ist eine teilweise lokal emissionsfreie Fahrt möglich [Ebb12, S. 1], [Ian14, S. 303]. Neben dem kompletten Abschalten können Betriebspunkte des Verbrennungsmotors mit schlechtem Wirkungsgrad vermieden werden [Sci07, S. 60], [Kha10, S. 149–150], [Ebb12, S. 1], [Ade09, S. 99]. Das ist dadurch möglich, dass die nötige Leistung des Fahrzeugs entweder durch eine Energiequelle oder eine Kombination aus mehreren Energiequellen bereitgestellt und Energie zwischengespeichert werden kann [Sci07, S. 60], [Ser09a, S. 9]. Die direkte Kopplung zwischen Verbrennungsmotor und der Straße wird aufgehoben [Ser08, S. 4498].

Derzeit ist ein steigender elektrischer Leistungsbedarf bei Nebenverbrauchern im Bereich der Sicherheits- und Komfortelektronik zu verzeichnen [Rei14, S. 201], [Sei14, S. 253]. Zudem werden mechanische und hydraulische Komponenten durch elektrische Komponenten ersetzt [Nui03, S. 1], [Koo06, S. 113]. Durch die Elektrifizierung von Nebenverbrauchern und einem von der Drehzahl des Verbrennungsmotors entkoppelten, bedarfsorientierten, vom Energiemanagement gesteuerten Betrieb, sind weitere Kraftstoffeinsparungen möglich [Hil11, S. 121–123], [Kha10, S. 149–150], [Büc08, S. 2], [Eng09, S. 18], [Lun09, S. 93]. Außerdem wird die Versorgung weiterer externer Geräte mit Hochvolt-Spannung bei Hybrid- und Elektrofahrzeuge ermöglicht [Ian14, S. 303].

Weitere Betriebskosten entstehen durch die begrenzte Lebensdauer der Komponenten im Hybridsystem, an die bei Nutzfahrzeugen im Vergleich zu Personenkraftwagen höhere Anforderungen gestellt werden [Hoe13, S. 503], [Ian14, S. 302]. Bei einigen Komponenten, wie beim Elektromotor ist dies unproblematisch [Küh10, S. 4510]. Bei anderen Komponenten, wie bei Batterien, wird der Austausch bzw. die Wartung von Komponenten weitere Betriebskosten verursachen.

Neben dem wesentlichen Ziel, die Gesamtbetriebskosten zu minimieren, müssen die von der Gesetzgebung geforderten Schadstoff- und Geräuschemissionsziele erreicht werden [Ian14, S. 303]. Werden Vorgaben nicht eingehalten, entstehen weitere Betriebskosten und Einschränkungen. So gibt es bspw. schadstoffabhängige Straßenbenutzungsgebühren für Nutzfahrzeuge in Deutschland [Ick07, S. 31]. Zudem gibt es gesetzliche Regelungen, wie Umweltzonen und Fahrverbote bei (zu hohen) Emissionen [Hoe13, S. 501]. In manchen Städten darf sogar nur emissionsfrei gefahren werden [Dre12, S. 12].

1.1.2 Fahrzeugvarianz in der Nutzfahrzeugbranche

Es gibt für Nutzfahrzeuge eine große Vielfalt an Anwendungen und Einsatzbereichen. Dementsprechend sind die Fahrzeugspezifikationen variantenreich [Mol09, S. 307], [Hil11, S. 105], [Hil11, S. 289], [Ian14, S. 302]. Daher ist es leicht nachvollziehbar, dass verschiedenste technische Lösungen für den Antrieb des Fahrzeugs ökonomisch optimal sein können [Ese14, S. 122], [Hoe13, S. 503]. Ein Zukunftsszenario für Nutzfahrzeuge, in dem verschiedenste Antriebstechnologien koexistieren und hybride Antriebe mit unterschiedlichen Elektrifizierungsgraden eingesetzt werden, ist höchstwahrscheinlich [Ese14, S. 129–130], [Ese14, S. 122]. Beim Elektrifizierungsgrad oder Hybridisierungsgrad wird zwischen Mikrohybrid, Mildhybrid und Vollhybrid sowie Plug-In Hybrid entsprechend der elektrischen Antriebsleistung sowie der elektrisch realisierten Funktionen unterschieden [Wal10, S. 54]. Entsprechend der Topologie kann zwischen seriellen, parallelen und leistungsverzweigten Hybridantrieb unterschieden werden [Hof10, S. 17], [Kha10, S. 148].

Das Spektrum für verschiedene Antriebsstrang-, Bordnetz- und Nebenaggregate ist bei Hybridfahrzeugen sehr vielfältig [Eng09, S. 1]. Die Antriebsenergie kann über einen Verbrennungsmotor oder mit Energie aus einem Speicher, also mit Batterien, Brennstoffzellen, Ultracaps (das sind hochkapazitive Doppelschichtkondensatoren [Chr06, S. 25]) oder kontinuierlich, zum Beispiel durch konduktive Übertragungssysteme in Form von Oberleitungen bereitgestellt werden [Grü12, S. 3–4]. Zudem werden bei Bussen und Lkw auch Fahrzeugtopologien mit mehreren Energiespeichern eingesetzt [Pis05a, S. 65]. Eine Kombination von zwei verschiedenen Speichern, wie von einer Batterie und einem Ultracap, kann hohe Leistungsanforderungen für die Batterie vermeiden [Laj12b, S. 1112], [Laj11, S. 1], [Bub12, S. 366]. Zudem kann im Vergleich zu einem Hybridantrieb mit nur einer Batterie der Gesamtwirkungsgrad im Antrieb verbessert und mehr elektrische Leistung durch Rekuperation gespeichert werden [Laj10, S. 7].

Die Anzahl und Ausprägung der Nebenverbraucher und somit der Energiebedarf dieser ist in Lkw sehr unterschiedlich. Es werden bspw. unterschiedliche Klimatisierungen für in den geometrischen Abmessungen stark variierende Fahrerhäuser verbaut. Weitere Nebenverbraucher sind Motorkühlungen, Druckluftsysteme, Lichtmaschinen für das Bordnetz, Lenkhilfspumpen und Steuergeräte [Hil11, S. 107]. Auf einen Lkw können Komponenten wie Kräne, Lasthaken, Kipper, Müllpressen bei Müllsammelfahrzeugen, Pumpen bei Tankfahrzeugen, Schleppwinden, Hebe- und Senkvorrichtungen, Mischer, Klimatisierungen für gekühlte Frachtbereiche oder Hebebühnen montiert werden [Hil11, S. 98–100]. Der Energiebedarf bei Fahrzeugen mit gekühltem Frachtbereich ist bspw. um 20% höher als bei ungekühlten [Hil11, S. 56]. Bei Bussen gibt es auch unterschiedlichste Nebenverbraucher, wie für die Klimatisierung des Innenraums, Türöffnungsanlagen, Kneeling-Funktionen (Absenken beim Ein- und Aussteigen) bei Stadtbussen, Rampen an den Türen zum Ein- und Aussteigen und Toiletten bei Reisebussen [Hil11, S. 104–105]. Damit bei Hybridfahrzeugen die volle Funktionalität der Nebenverbraucher bei der rein elektrischen Fahrt gewährleistet ist, sind elektrische Antriebe der Nebenverbraucher notwendig statt, wie bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen, einer direkten Kopplung mit dem Verbrennungsmotor [Hof10, S. 195], [Wal10, S. 102].

Mit steigendem Elektrifizierungsgrad, also höherer Leistung des Elektromotors und Kapazität des Energiespeichers im Antrieb, steigt das Kraftstoffeinsparungspotenzial und somit ein wesentlicher Anteil der Betriebskosten [Laj14b, S. 9]. Unter den Hybriden können Plug-in Hybride das volle Potenzial ausschöpfen [Laj12a, S. 1]. Zudem hängt das Kraftstoff-einsparungspotenzial stark vom Fahrprofil ab [Hil11, S. 131; Laj14c, S. 83]. Entsprechend des Grades der Elektrifizierung entstehen aber auch unterschiedliche Anschaffungskosten [Laj14b, S. 9]. Werden viele verschiedene Komponenten verbaut, steigen zudem das Gewicht, die Systemkomplexität und die Kosten [Ebb12, S. 1]. Ein steigendes Gewicht ist für die erforderliche Nutzlast problematisch [Hoe13, S. 503]. Daher muss je nach Anwendung abgeschätzt werden, welcher Elektrifizierungsgrad und welche Antriebstopologie wirtschaftlich sind. Sowohl serielle als auch parallele Hybridkonzepte besitzen Vor- und Nachteile, sodass letztendlich Fahrprofil und äußere Randbedingungen die Auswahl bestimmen werden [Hof10, S. 52]. Beim Einsatzprofil für Lkw kann zwischen städtischem Lieferverkehr, Kommunalfahrzeugen (z.B. Müllsammelfahrzeuge), regionalem Lieferverkehr, Fernverkehr und Baustellenfahrzeugen unterschieden werden [Hil11, S. 65], [Mol09, S. 308]. Durch einen Full-Hybrid im Vergleich zu einem konventionellen Lkw können bei Fernverkehrs Lkw 4-10% und bei städtischem Lieferverkehr und Kommunalfahrzeugen 15-30% Kraftstoff eingespart werden [Hil11, S. 131]. Bei Bussen wird zwischen Stadt-, Überland- und Reisebussen unterschieden [Hil11, S. 71]. Bei einem Überlandbus/Reisebus sind Kraftstoffeinsparungen von bis zu 20% und bei Stadtbussen von

20-40% bei einem Full-Hybrid gegenüber konventionellen Fahrzeugen möglich [Hil11, S. 131]. Somit wird die Hybridvariante für Nutzfahrzeuge mit unterschiedlichen Einsatzprofilen durch das Kraftstoffeinsparungspotenzial und die Anschaffungskosten des Hybridantriebs bestimmt (Abbildung 1.2).

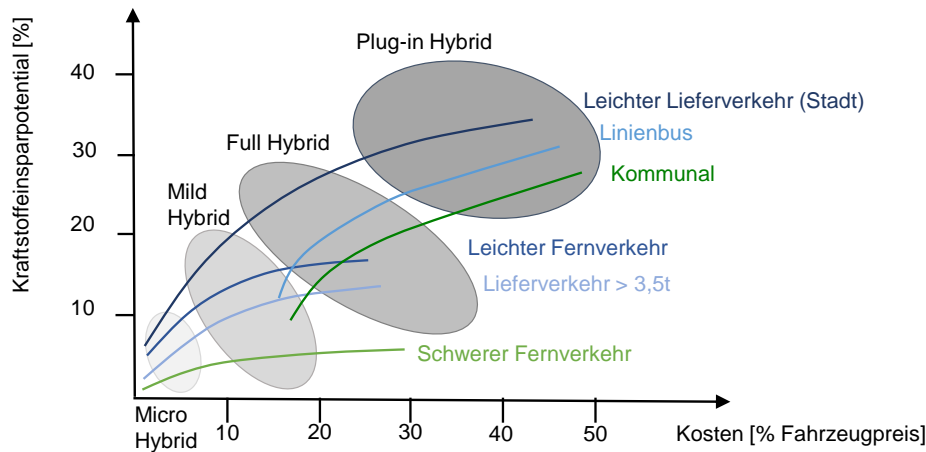


Abbildung 1.2: Kraftstoffeinsparpotential über Hybridsystemkosten bei Nutzfahrzeugen [Hoe13, S. 507]

Vor allem bei leichten Lkw ist eine stärkere Hybridisierung, also elektrische Antriebe, Plug-in-Hybride und Antriebe mit Range-Extender zu erwarten [Grü12, S. 3], [Mol09, S. 313]. Mit steigendem Gewicht des Lkw nimmt der Grad der Elektrifizierung ab [Mol09, S. 313]. Für mittelschwere Lkw werden meist diesel-elektrische parallel hybride Antriebsstränge mit Lithium-Ionen Batterien verwendet [Mol09, S. 309]. Mittelschwere gewerbliche Lkw werden vor allem in den USA elektrifiziert [Ian14, S. 303–304]. Zudem sind Müllsammelfahrzeuge besonders geeignet für eine Hybridisierung, weil sie typische Stop-and-Go Fahrprofile aufweisen [Ser08, S. 4498], [Die09, S. 25–26]. Außerdem verursachen sie in den frühen Morgenstunden, in denen sie aufgrund des geringen Verkehrs eingesetzt werden, weniger Lärm [Ese14, S. 127]. Für elektrifizierte Lkw im Verteilerverkehr lohnen sich die prozentual hohen Kraftstoffeinsparungen aufgrund der höheren Anschaffungskosten in Deutschland nicht [Hoe13, S. 501], [Ese14, S. 122–123].

Für schwere Lkw im Fernverkehr kann eine Marktdurchdringung mit Batterie-elektrischen Plug-in Hybriden und Fahrzeugen mit Range-Extender nicht vorhergesagt werden, weil die Batterien sehr schwer und kostenintensiv wären und lange Ladezeiten die Transportzeiten einschränken würden [Grü12, S. 3], [Ese14, S. 122–123], [Lie12, S. 15–16]. Daher werden im Fernverkehr vor allem parallele Hybride eingesetzt, mit denen bei Bergfahrten aufgrund der hohen Fahrzeugmassen viel Energie rekuperiert werden kann [Ese14, S. 127–128]. Wird nur die prozentuale Kraftstoffeinsparung betrachtet, ist diese für Fernverkehrs Lkw nicht hoch [Ese14, S. 122–123]. Aufgrund der weiten Strecken ist aber die Kosteneinsparung durch die Elektrifizierung neben den Stadtbussen am größten [Ese14, S. 122–123], [Laj14c, S. 71], [Lie12, S. 24], [Ian14, S. 303–304], [Ian14, S. 306]. Möglich sind zudem stärker elektrifizierte Fernverkehrs Lkw, die ihren Strom über Oberleitungen mit Hilfe eines Pantographen beziehen [Lie12, S. 15–16]. Ein Beispiel stellt der ENUBA Lkw von Siemens dar. In diesem ist zudem eine Motor-Generatoreinheit und ein elektrischer Speicher verbaut [Grü12, S. 5–7]. Neben dem Fernverkehr wird der Einsatz im Pendelverkehr zum Beispiel für Schüttgut von Bergwerken zu Verladeeinrichtungen oder im Pendelverkehr für Frachten (z.B. Container) zur Verbindung eines Hafens mit Güterverkehrszentren gesehen [Grü12, S. 9]. Für sehr schwere Nutzfahrzeuge, wie bspw. beim

Großmuldenkipper T282B von Liebherr werden elektrische Antriebe im Megawatt Leistungsbereich als serielle diesel-elektrischer Hybride eingesetzt. Dies ist aufgrund der hohen geforderten Momente, und um riesige mechanischen Getriebe zu vermeiden, nötig. Zudem sind die Wartungskosten geringer und elektrischer Strom kann für weitere Nebenverbraucher verwendet werden [Mol09, S. 315].

Den größten Anteil an Hybridbussen stellen Stadtbusse dar [Laj14b, S. 2]. Diese sind besonders geeignet für eine Hybridisierung des Antriebstrangs, weil sie ein typisches Stop-and-Go Fahrprofil aufweisen, bei dem viel rekuperiert werden kann und der Dieselmotor andernfalls ständig im Leerlauf oder bei sehr niedrigen Drehzahlen in einem schlechten Wirkungsgrad betrieben würde [Ser08, S. 4498], [Nyl12, S. 66], [Küh10, S. 4510], [Eng09, S. 1], [Die09, S. 25–26]. Die meisten hybriden Stadtbusse, die derzeit auf dem Markt verfügbar sind, besitzen einen seriell hybriden Antriebsstrang [Laj14b, S. 2], der ein besonders hohes Kraftstoffeinsparungspotenzial bei Fahrprofilen mit niedrigen Geschwindigkeiten hat [Laj13a, S. 886]. Für Reisebusse mit höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten eignen sich parallele Hybridantriebe besser [Laj13a, S. 886]. Die Hybridisierung oder gar komplette Elektrifizierung von Stadtbussen kann zudem die Geräuschemissionen in den Städten reduzieren und den Geräuschkomfort für die Fahrgäste verbessern [Laj12a, S. 1], [Küh10, S. 4510]. Zudem haben sie eine große Auswirkung auf die Luftqualität der Stadt [Nyl12, S. 35]. Der Hybridantrieb kann bei Stadtbussen bereits heute wirtschaftlich gut dargestellt werden, weil Mehrkosten für die Hybridisierung durch die Ersparnis auf der Kraftstoffseite nach ca. fünf Jahren wieder eingespielt werden können [Hoe13, S. 501], [Lie12, S. 34]. Demnach wird bei Bussen, insbesondere bei Stadtbussen, der Anteil der hybriden Fahrzeuge zunehmen [Mol09, S. 313].

Unter den rein elektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugen sind ebenfalls die meisten Nutzfahrzeuge Busse, meist Oberleitungsbusse [Hil11, S. 95]. Elektrische Oberleitungsbusse werden seit Jahrzehnten auf der ganzen Welt, in Städten wie Bern, Linz, Zürich, Boston, Arnheim und Rom betrieben [Küh10, S. 4512]. Derzeit sind rund 40.000 Busse im Linienverkehr in ca. 370 Städten und 47 Ländern eingesetzt [Gis14, S. 136]. In viele wurden zudem Ultracaps verbaut, wie bspw. in den Oberleitungsbusen in Solingen, Deutschland [Küh10, S. 4511]. Aber es werden auch immer mehr Lithium-Ionen Batterien als Energiespeicher in elektrischen Bussen eingesetzt [Laj12b, S. 1112]. Wird davon ausgegangen, dass sich die Lithium-Ionen Speichertechnologie weiterentwickelt und die Kosten für Batterien weiter sinken, werden zunehmend mehr Stadtbusse elektrisch mit Batterie fahren [Laj12b, S. 112]. Bereits heute werden vor allem in China batterieelektrische Busse stark subventioniert und eingesetzt [Ian14, S. 303–304].

Brennstoffzellenantriebe sind unter den Nutzfahrzeugen bei Stadtbussen am besten geeignet, weil sie lokal emissionsfrei fahren können, relativ leise sind und nur eine eingeschränkte Infrastruktur an einer zentralen Stelle nötig ist [Bub10, S. 3939]. Das Betreiben von Fahrzeugen mit Wasserstoff hat allerdings den Nachteil, dass von der Gewinnung von Wasserstoff bis zum eigentlichen Antreiben des Fahrzeugs große Wirkungsgradverluste auftreten. Zudem ist die Brennstoffzellentechnologie kostenmäßig noch weit von einem wirtschaftlichen Serieneinsatz entfernt [Lie12, S. 29].

Um mit der Variantenvielzahl an Antriebssträngen bei Nutzfahrzeugen (Anhang A) umzugehen und keine explodierenden Kosten zu haben, ist ein modularer Ansatz mit Gleichteilen in der Entwicklung nötig [Gis14, S. 133], [Ese14, S. 131–132], [Hoe13, S. 507–508], [Egl11, S. 135]. Dies bezieht sich nicht nur auf mechanische Gleichteile, sondern auch auf das Energiemanagement [Bas14, S. 376], [Egl11, S. 135]. Ein Bewertungskriterium für das Energiemanagement ist der Entwicklungsaufwand für die Funktionsentwicklung,

Applikation und Absicherung [Gru10, S. 14]. Ziel eines Energiemanagement für hybride Nutzfahrzeuge sollte es demnach sein, dieses so zu gestalten, dass es nicht grundlegend für jede Fahrzeugvariante neu entwickelt werden muss.

2 Stand der Wissenschaft: Energiemanagement für Hybridfahrzeuge

Im Antriebsstrang bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen stellt ausschließlich der Verbrennungsmotor die Antriebsleistung bereit. Sein Betriebspunkt ist bei einer gegebenen Getriebeübersetzung fest durch die Fahrzeuggeschwindigkeit und das Drehmoment am Rad vorgegeben [Sei00, S. 13]. Ein Hybridantrieb hingegen ist eine Kombination von mindestens zwei unabhängigen Energiewandlern und mindestens zwei Energiespeichern [Böc08, S. 5]. Da es mehrere Quellen und Senken gibt, ergeben sich bei der Energieerzeugung, -speicherung und -verteilung Freiheitsgrade [Hof10, S. 208], [Kok06, S. 92]. Mit der Festlegung der freien Parameter beschäftigen sich Energiemanagementverfahren auf unterschiedliche Weise.

2.1 Freiheitsgrade und Betriebsmodi in Hybridfahrzeugen

Hybridfahrzeuge haben mindestens einen Knotenpunkt, an dem die Energieverteilung zwischen den Quellen und Senken festgelegt werden muss. Zwischen den Komponenten und dem Knotenpunkt sind im Hybridfahrzeug teilweise Energiewandler nötig, um die Energieform anzupassen (Abbildung 2.1). Die Freiheitsgrade werden durch die mögliche Wahl der Betriebsmodi (z.B. elektrisch, verbrennungsmotorisch oder hybrides Fahren) und der Ausprägung der Betriebsmodi (z.B. genaue Leistungsverteilung bei hybridem Fahren) sichtbar.

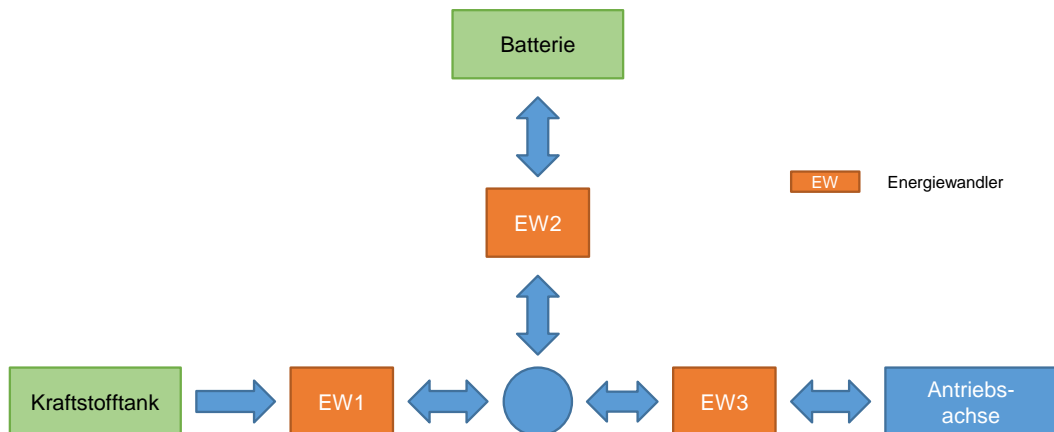


Abbildung 2.1: Energieflüsse im Hybridfahrzeug mit einem Kraftstofftank und einer Batterie als Energiequelle, angelehnt an [Sch09, S. 77]

Bei einem seriellen Hybrid ist zwischen der Batterie und dem Energieknotenpunkt kein Energiewandler nötig (Abbildung 2.2). Wenn über den elektrischen Traktionsmotor gebremst wird und der Betriebsmodus Rekuperation vorliegt, speichert die Batterie die Bremsenergie direkt. Notfalls kann die Energie zudem über die Motorbremse des Verbrennungsmotors in Wärme umgewandelt werden. Im Antriebsfall kann die Leistung für den elektrischen Traktionsmotor über den Kraftstoff und die Verbrennungsmotor-Generator-Einheit bereitgestellt werden. Das stellt den Betriebsmodus verbrennungsmotorisches Fahren dar. Die Antriebsleistung kann aber auch über die Batterie im Betriebsmodus elektrisches Fahren bereitgestellt werden. Zudem kann die Antriebsleistung über einen Beitrag von beiden Energiequellen beim hybriden Fahren bereitgestellt

werden. Stellt die Verbrennungsmotor-Generator-Einheit mehr elektrische Leistung bereit, als für den Antrieb notwendig ist, liegt der Betriebsmodus Lastpunktanhebung vor und die Batterie wird zusätzlich geladen [Sch09, S. 78]. Somit kann der Verbrennungsmotor nahezu unabhängig von der geforderten Antriebsleistung betrieben werden [Sei00, S. 13]. Der Betrieb des elektrischen Antriebmotors ist allerdings durch die Fahrzeuggeschwindigkeit und ein Übersetzungsverhältnis festgelegt [Göh97, S. 32]. Gleiche Betriebsmodi gelten für andere serielle Hybride, bspw. mit einer Brennstoffzelle und einer Batterie als Energiequelle [Fad11, S. 3271].

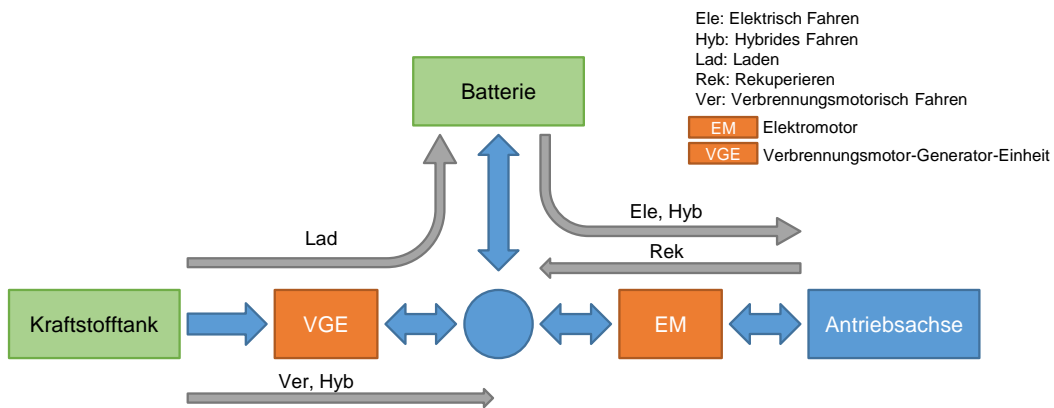


Abbildung 2.2: Betriebsmodi im seriellen Hybrid

Beim parallelen hybriden Antriebsstrang können dieselben Betriebsmodi festgelegt werden (Abbildung 2.3). Der Unterschied ist, dass bei einem parallelen Hybrid die Drehzahl des Verbrennungsmotors aufgrund der mechanischen Koppelung durch die aktuelle Getriebeübersetzung und die Fahrzeuggeschwindigkeit vorgegeben ist [Sei00, S. 13], [Bau00, S. 60]. Dennoch ist das Moment des Verbrennungsmotors frei einstellbar.

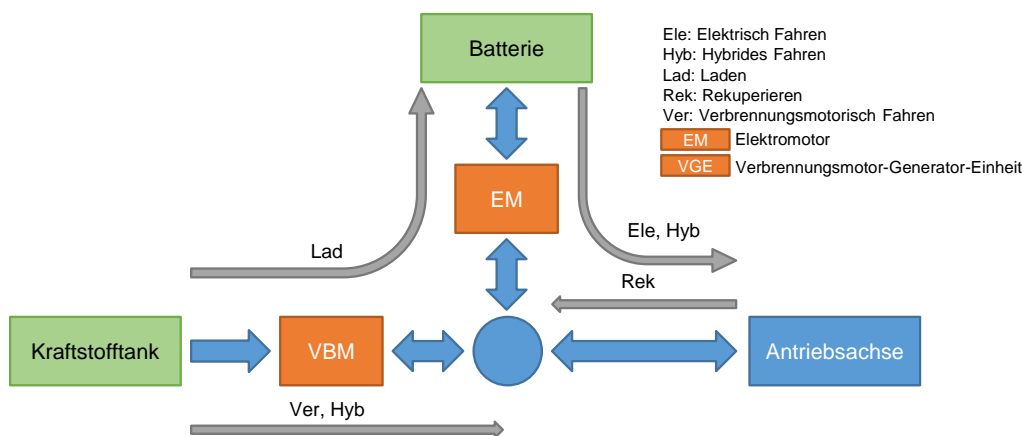


Abbildung 2.3: Betriebsmodi im parallelen Hybrid

Ein leistungsverzweigter Hybrid kombiniert den seriellen und parallelen Hybridantrieb während der Fahrt. Der Verbrennungsmotor kann mit einem Generator die Batterie laden und der Elektromotor treibt an (serieller Hybridantrieb) oder der Verbrennungsmotor kann mit der Antriebswelle gekoppelt werden (paralleler Hybridantrieb) [Hoe13, S. 503–504], [Kha10, S. 148]. Die Anzahl der möglichen Betriebsmodi vergrößert sich mit weiteren Quellen und Senken. Bspw. kann die Batterie aus einem externen Netz geladen werden

oder auch in dieses einspeisen. Zudem kann insbesondere bei Nebenverbrauchern mit Komfort-Funktionen die Leistung variiert werden [Büc08, S. 21].

2.2 Aufgaben des Energiemanagements

Ein Energiemanagement setzt vorhandene Freiheitsgrade in der Bereitstellung oder der Nutzung der Energie voraus. Es müssen demnach entweder mehrere alternative Quellen oder Senken oder beides verfügbar sein [Wag04, S. 92]. Entsprechend der Freiheitsgrade kann das Energiemanagement in ein Energieversorgungsmanagement und ein Energieverteilungsmanagement aufgeteilt werden [Kok06, S. 92], [Hof10, S. 207–208]. Werden Speicher gesondert betrachtet, muss ein Energiemanagement das Lade-, Speicher- und Verteilermanagement beinhalten [Spi02, S. 49].

Unabhängig von der Anordnung der Energiekomponenten ist die Aufgabe des Energiemanagements den aktuellen Energiefluss, also den Leistungsfluss zu jeder Zeit, zu steuern [Pis05a, S. 65], [Böc08, S. 18], [Riz14, S. 3], [Bra13, S. 449]. Dadurch gibt das Energiemanagement den Betriebsmodus und die Ausprägung der Betriebsmodi vor [Böc08, S. 18]. Die Anzahl der Steuerungsvariablen in einem Hybridfahrzeug hängt von der Anzahl der Freiheitsgrade ab. Wird die fest vorgegebene Leistungsbereitstellung für den Antrieb nur zwischen einer Motor-Generator-Einheit und einer Batterie verteilt, gibt es einen Freiheitsgrad und die Steuerungsvariable ist bspw. die Leistung, die die Batterie bereitstellen soll [Riz14, S. 3]. Gibt es hingegen zwei Quellen und eine zusätzliche leistungsvariable Senke, so sind zwei Steuerungsparameter nötig. Die Anzahl der Steuerungsparameter N_u des Energiemanagements hängt somit von der Anzahl der steuerbaren Quellen N_Q und der Anzahl der steuerbaren Senken N_S nach (Gl. 2.1) ab.

$$N_u = N_Q + N_S - 1 \quad (\text{Gl. 2.1})$$

Die Optimierung des Energieflusses in einem Bordnetz eines konventionellen Fahrzeugs wird teilweise auch als Energiemanagement bezeichnet [Böc08, S. 19], [Büc07, S. 57]. Zudem wird der Begriff Energiemanagement [Ans14, S. 360] und Betriebsstrategie [Jör09, S. 111], [Rei10a, S. 23], [Hof10, S. 209] synonym für die Verteilung der Antriebsleistung auf verschiedene Energiequellen im hybriden Antriebsstrang verwendet. Dann ist nur das Traktionsmanagement gemeint. Bei Hybridfahrzeugen liegt jedoch eine starke Koppelung zwischen Antriebsstrang und Nebenverbrauchern vor [Büc07, S. 57], [Sch09, S. 3]. Das liegt daran, dass die Energie für die Nebenverbraucher aus dem Antriebsstrang bereitgestellt wird [Spi02, S. 43–44]. Somit wird im Folgenden der Begriff Energiemanagement erweitert. Dieser beinhaltet nicht nur die reine Traktionsaufgabe, sondern umfasst neben den Energieumsätzen für die Traktion auch die der Nebenverbraucher [Wag04, S. 92].

In einem seriell hybriden Antriebsstrang wird an dem Knotenpunkt die elektrische Leistung verteilt (Abbildung 2.4). Bei einem parallelen Hybrid hingegen muss die mechanische Leistung an einem Knotenpunkt verteilt werden und die elektrische Energie an einem weiteren Knotenpunkt (Abbildung 2.5). Zudem kann in beiden Fällen innerhalb des Nebenverbraucherbordnetzes mit mehreren Senken und ggf. einer Batterie erneut eine Verteilung stattfinden.

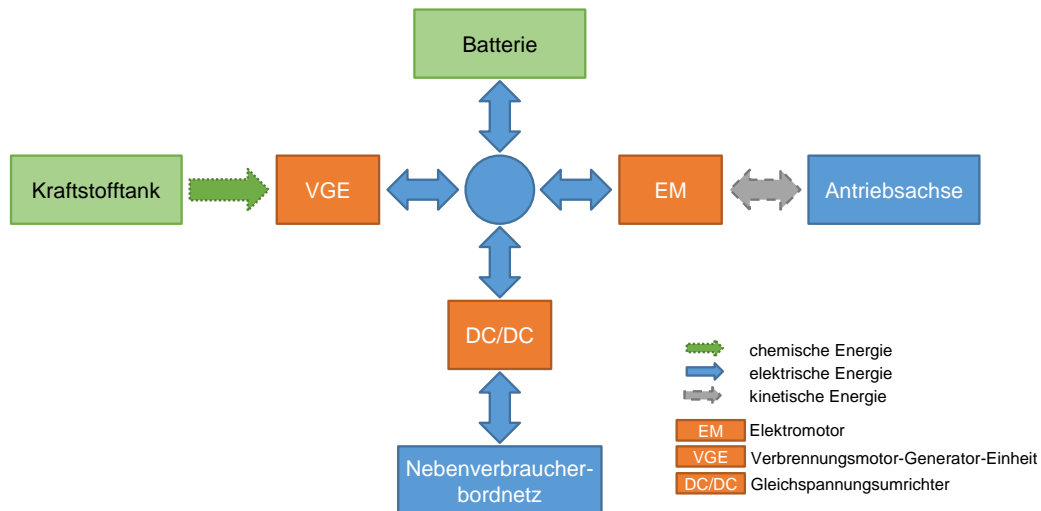


Abbildung 2.4: Energieformen im seriellen Hybrid

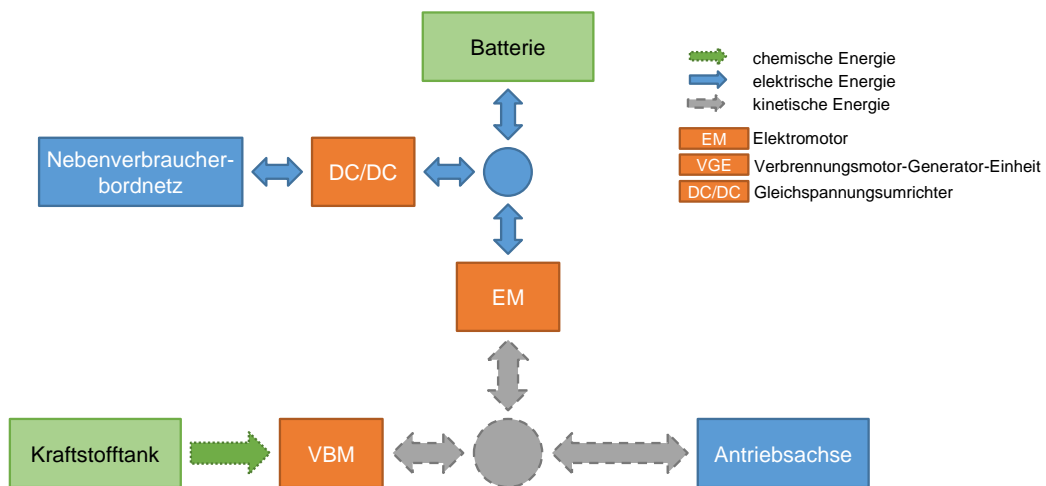


Abbildung 2.5: Energieformen im parallelen Hybrid

Die benötigte Energie zum Antrieb des Fahrzeugs ist mechanisch oder elektrisch. Nebenverbraucher benötigen hingegen Energie in sämtlichen Formen (Wärme z.B. Heizen und Kühlen von Komponenten, elektrisch z.B. elektrische Verbraucher, hydraulisch z.B. Lenkung, pneumatisch z.B. Bremsanlage). Ein Energiemanagement zur Verteilung von elektrischer Leistung ist am einfachsten von allen Energieformen zu realisieren. Dies ergibt sich aus folgenden Vorteilen der elektrischen Energieform [Büc08, S. 5]:

- gute Verteilbarkeit: schnell, zuverlässig, sauber, verlustarm
- sehr gute Steuerbarkeit: schnell und präzise messbar, steuerbar, regelbar
- sehr gute Nutzbarkeit: lässt sich in alle Nutzenergieformen umwandeln
- gute Speicherfähigkeit: je nach Technologie mit unterschiedlicher Energie- und Leistungsdichte

Für die Leistungsverteilung werden immer ein oder mehrere Optimierungsziele vorgegeben. Die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs ist meist das Optimierungsziel [Ser09a, S. 78], [Kle03, S. 1], [Hof10, S. 207–208]. Dieses ist gleichzusetzen mit der Minimierung des CO₂-Ausstoßes, weil dieser direkt mit dem Kraftstoffverbrauch zusammenhängt [Gru10, S. 11]. Bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellen ist das Optimierungsziel analog die Wasserstoffverbrauchsminimierung [Fad11, S. 3273]. Bei einer Verbrauchsminimierung

darf nicht nur der Verbrauch während der Fahrt betrachtet werden, sondern es muss ein sich ändernder Ladezustand des Speichers am Fahrtende im Vergleich zur Fahrtbeginn in einen zusätzlichen Verbrauch umgerechnet und mitberücksichtigt werden [Fad11, S. 3273]. Ein weiteres Optimierungsziel neben dem Kraftstoffverbrauch ist die Maximierung des Gesamtwirkungsgrades des Antriebs [Sch02, S. 461], [Sal07, S. 2393], [Fad11, S. 3273], [Ser09a, S. 78] bzw. die Minimierung des Gesamtverlustes [Jör09, S. 143]. Zudem können mehrere Ziele gleichzeitig aufgestellt werden, wie die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs und die Minimierung bestimmter Emissionen (nicht CO₂) [Riz14, S. 3], [Kop08, S. 15]. Allerdings treten bei mehreren Zielen wie Emissionsreduzierung und Wirkungsgradoptimierung Zielkonflikte auf, so dass ein Kompromiss gefunden werden muss [Sal07, S. 2393].

Neben dem Optimierungsziel müssen Nebenbedingungen eingehalten werden. Bspw. muss die durch den Fahrer geforderte Antriebsleistung bereitgestellt werden [Sal07, S. 2393]. Ferner sind die Grenzen des Batterieladezustands und des Energiedurchsatzes durch die Batterie [Hof10, S. 207–208], [Gru10, S. 13–14] und der zulässige Temperaturbereich vom Elektromotor einzuhalten [Hof10, S. 207–208].

Damit das Energiemanagement die Leistungsverteilung vorgeben kann, benötigt es Eingangsdaten. Diese können vom Fahrer, dem Fahrzeug und der Umgebung stammen [Kha10, S. 147]. Die Verteilung der Leistungsbereitstellung im Hybridfahrzeug könnte auch durch den Fahrer durchgeführt werden, aber es ist sehr viel einfacher und effizienter, dies durch das Energiemanagement durchführen zu lassen [Ser09a, S. 78], [Göh97, S. 33–35]. So gibt der Fahrer das geforderte Antriebsmoment über die Fahr- und Bremspedalstellung [Hof10, S. 209], [Sal07, S. 2393], [Göh97, S. 33–35] und ggf. weitere Eingaben wie Heizungs- bzw. Klimatisierungsanforderungen vor [Hof10, S. 209]. Zudem kann der Fahrer direkt Vorgaben machen, die rein elektrisches Fahren zur Folge haben sollen [Göh97, S. 33–35]. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, das Fahrerverhalten zu beobachten und zu lernen [Kha10, S. 147], [Hof10, S. 209], [Kha10, S. 153]. Der Fahrzeugzustand, wie die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit oder Beschleunigung, sowie Zustandsdaten der Fahrzeugkomponenten wie das momentane Drehmoment eines Motors, der Batterieladezustand, Temperaturen etc. können berücksichtigt werden [Kha10, S. 147], [Hof10, S. 209], [Sal07, S. 2393]. Aus der Umgebung können Daten wie der aktuelle Straßentyp oder Verkehrsinformationen, Vorhersagedaten oder Informationen über die aktuelle GPS-Position verwendet werden [Sal07, S. 2393]. Zusätzlich ist die Verwendung von car2x-Kommunikation oder gesammelte Informationen aus mehrfach gefahrenen Strecken auch möglich [Hof10, S. 209].

2.3 Energiemanagementverfahren

Einige der im Folgenden dargestellten Strategien wurden bei den zitierten Arbeiten nur auf das Traktions- oder nur auf das Bordnetzmanagement angewendet, andere auch für alle Leistungsflüsse im Fahrzeug.

2.3.1 Optimalsteuerung

Eine Optimalsteuerung ist eine nichtkausale ideale Steuertrajektorie, bei der alle exakten Informationen über die gesamte Fahrzeugbewegung im Voraus bekannt sind [Gru10, S. 8], [Fad11, S. 3271], [Wil09, S. 20]. Mit ihrer Hilfe kann eine global optimale Lösung zur Leistungsverteilung gefunden werden [Kha10, S. 151], [Bia11, S. 4], [Ser09a, S. 12]. Zur

Berechnung der Optimalsteuerung wird eine optimale Sequenz der Steuerungswerte $u(t)$ gesucht, die zur Minimierung der Gütefunktion J führt [Riz14, S. 3], [Kha10, S. 151] (Gl. 2.2). Die instantane Gütefunktion L hängt dabei von den Steuerungswerten, den Zustandswerten $x(t)$ und der Zeit t ab. Der Optimierungszeitraum ist $[t_0, t_f]$.

$$J(x(t), u(t)) = \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), u(t), t) dt \quad (\text{Gl. 2.2})$$

Zusätzlich kann bspw. eine Nebenbedingung für den Batterieladezustand über eine Straffunktionen $\phi(SOC_{Batt})$ eingeführt, die den Ladezustand SOC_{Batt} möglichst auf einem optimalen Level halten soll (Gl. 2.3). Entspricht die instantane Gütefunktion, angewendet auf einen parallelen Hybrid, dem Kraftstoffmassenstrom, wird sie minimal, wenn rein elektrisch gefahren und die Batterie entladen wird. Das wird durch die Straffunktion verhindert [Sci07, S. 62–63].

$$J = \phi(SOC_{Batt}) + \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), u(t), t) dt \quad (\text{Gl. 2.3})$$

Bei analytischen Optimierungsverfahren wird eine analytische Problemformulierung zum Finden des Optimums genutzt oder analytische Formeln bereitgestellt, die eine schnellere Lösung als mit einem numerischen Verfahren ermöglichen. Zu den analytischen Optimierungsmethoden zählen das Minimierungsprinzip nach Pontryagin und die Gleichung nach Hamilton-Jacobi-Bellmann [Ser09a, S. 82]. Das Minimumprinzip von Pontryagin zeigt notwendige, aber nicht hinreichende Voraussetzungen für eine optimale Steuerung auf [Ser09a, S. 86]. Lösungen, die alle Anforderungen des Minimumprinzips erfüllen, sind Extremwertsteuerungen [Ser09a, S. 86]. Eine analytische Lösung des Optimierungsproblems bei Hybridfahrzeugen kann nur gefunden werden, wenn die Leistungsflüsse im Fahrzeug mit simplen analytischen Funktionen beschrieben werden können [Ser09a, S. 14]. Selbst dann ist dies oft sehr schwierig [Kha10, S. 151]. Wenn zu viele Vereinfachungen gemacht werden, bildet das Modell das reale System nicht mehr ausreichend ab und die resultierenden optimalen Steuerungen sind tatsächlich suboptimal [Ser09a, S. 86]. Notwendige Annahmen, um eine analytische Lösung für ein Optimierungsproblem zu finden, können nicht für andere hybride Antriebsstrangkonfigurationen übertragen werden [Sci07, S. 66]. Eine analytische Optimalsteuerung zur Berechnung des global optimalen Kraftstoffverbrauchs bei einem gegebenen Fahrzyklus wurde bereits für einen parallelen Hybrid [Del04, S. 875] und einen seriellen Hybrid [Ser08, S. 4501–4502] berechnet.

Neben der analytischen Lösung der Optimalsteuerung kann die optimale Steuertrajektorie auch numerisch mit der dynamischen Programmierung berechnet werden [Kle03, S. 16], [Sci07, S. 69]. Numerische Verfahren sind allerdings rechenintensiver als analytische Optimierungsverfahren [Sci07, S. 65]. Dynamische Programmierung kann bei dynamischen, nichtlinearen Optimierungsproblemen mit Nebenbedingungen eingesetzt werden [Lin03, S. 843], [Hof07, S. 76]. Es ist das einzige Verfahren zum Finden einer Optimalsteuerung, das in der Lage ist, eine optimale Lösung für ein beliebig komplexes Optimierungsproblem zu finden [Ser09a, S. 87], [Ans14, S. 360], [Ebb12, S. 13]. Dieses Verfahren wird üblicherweise in der Literatur verwendet, um eine global optimale Lösung für die Leistungsverteilung in einem Hybridfahrzeug zu finden, wenn davon ausgegangen wird, dass alle Information über das zukünftige Fahrprofil vollständig vorhanden sind [Ser09a, S. 12–13], [Bia11, S. 4], [Ans14, S. 360]. Daher ist dynamische Programmierung eine nicht kausale Betriebsstrategie und nur in der Simulation implementierbar [Ser09a, S. 87]. Wie bei der analytischen Optimalsteuerung, wird auch bei der dynamischen Programmierung eine Gütefunktion für ein Fahrprofil minimiert [Kha10, S. 152]. Da es sich um ein nu-

merisches Verfahren handelt, müssen die Zustands- und Zeitvariablen sowie die Gütefunktion diskretisiert werden [Sci07, S. 64].

Bei der dynamischen Programmierung wird ein Optimierungsproblem zeitlich gesehen rückwärts gelöst, wobei vom Endzeitpunkt des Fahrprofils ausgegangen wird und dann rückwärts in der Zeit bis zum Startzeitpunkt gerechnet wird. Das Verfahren basiert auf dem Optimalitätsprinzip von Bellman [Bel57, S. 83], das besagt, dass die Steuerungsabfolge von einem beliebigen Zeitpunkt bis zum Endzeitpunkt einer optimalen Steuerungsabfolge ebenfalls optimal ist. Daher können die Steuerungsgrößen für die optimale Leistungsverteilung schrittweise vom Endzeitpunkt bis zum aktuellen Zeitpunkt berechnet werden (Abbildung 2.6). Die vorherberechneten Werte der Steuertrajektorie und der entstehende Kraftstoffverbrauch, der gleich der Summe der Werte zwischen den gewählten Betriebspunkten ist, werden jeweils zwischengespeichert und anschließend die optimalen Steuerungsgrößen für den Zeitschritt davor berechnet [Ser09a, S. 12–13].

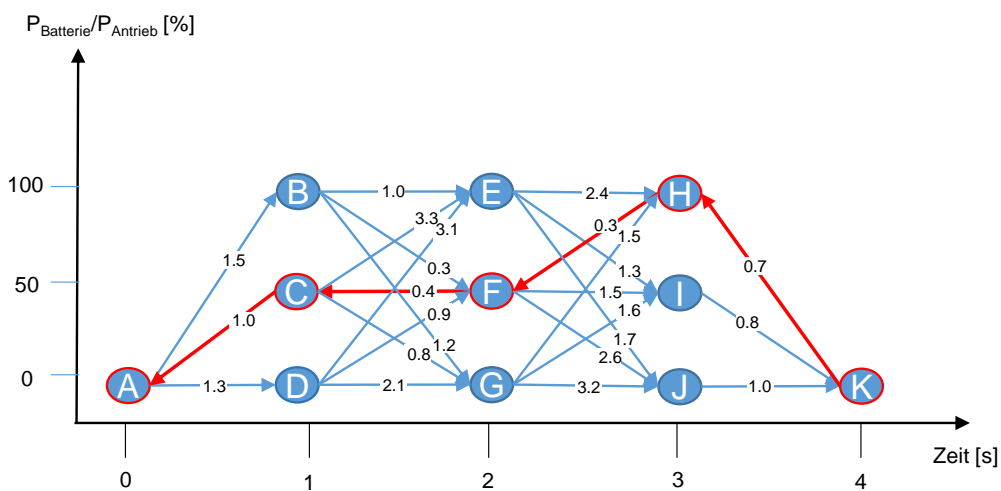


Abbildung 2.6: Vorgehen dynamische Programmierung, angelehnt an [Ser09a, S. 92]

Die Anzahl der diskreten Werte der Steuerungsgrößen und die Anzahl der Zeitschritte haben einen wesentlichen Einfluss auf den Rechenaufwand [Bac05, S. 29] und die Exaktheit der optimalen Lösung [Ebb12, S. 13]. Der Rechenaufwand steigt linear mit der Zeit und sogar exponentiell mit der Anzahl der Steuerungsgrößen und der sich damit ergebenden Lösungsmöglichkeiten [Sci07, S. 65], [Jeo12, S. 4–5]. Somit muss für die Anzahl der Lösungsmöglichkeiten, die betrachtet werden, ein Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Genauigkeit der optimalen Lösung gefunden werden [Ser09a, S. 90–91].

Bei einer der ersten Arbeiten zur dynamischen Programmierung wird für einen seriellen Hybrid der Energieverbrauch der Verbrennungsmotor-Generator-Einheit für einen zuvor definierten Fahrzyklus minimiert [Bra00, S. 61–62]. Bei Leistungsverteilungen zur Traktion bei Hybridfahrzeugen mit Hilfe der dynamischen Programmierung können über zusätzliche Bedingungen Betriebsgrenzen sichergestellt, der Ladezustand auf einem Bereich gehalten oder ein ständiger Gangwechsel verhindert werden [Lin01, S. 6], [Lin01b, S. 2880], [Pér06, S. 245]. Mehrere Optimierungsziele, die gegeneinander gewichtet werden, sind beim Finden der optimalen Verteilung für die Traktion [Lin03, S. 842] auch möglich. Zur Berechnung des theoretisch optimalen Betriebs der Lichtmaschine in einem konventionellen Fahrzeug in einem Fahrzyklus wird dynamische Programmierung bei [Koo04, S. 4074] und [Koo05, S. 774–775] verwendet. Dynamische Programmierung kann auch streckenbezogen statt zeitbezogen angewendet werden, wie z.B. bei [Laj13b, S. 4–5] für einen Fahrlader für den Bergbau. Um den Rechenaufwand der dynamischen Program-

mierung zu senken, wird diese in [Sun09, S. 99–100] und [Amb09, S. 36–37] für einen parallelen Hybrid dahingehend verbessert, dass der Lösungsbereich eingegrenzt und nicht jede Lösungsmöglichkeit für einen vorgegebenen Fahrzyklus berechnet wird. Das beschriebene Verfahren ist allerdings nur für eine Zustandsvariable einsetzbar. Dynamische Programmierung wird auch bei [Ebb12, S. 21] und [Elb14, S. 25–26] dahingehend verbessert, dass Lösungsmöglichkeiten, die nicht erreichbar sind, ausgeschlossen werden. Bei [Ans14, S. 366–368] werden mit Hilfe der dynamischen Programmierung zwei Steuergrößen für die optimale Leistungsverteilung für ein Fahrzeug mit einer Brennstoffzelle und zwei elektrischen Speichern, einer Batterie und einem Ultracap, für einen definierten Fahrzyklus berechnet.

2.3.2 Modellprädiktive Regelung

Bei der modellprädiktiven Regelung wird ein Modell verwendet, um die Auswirkungen der Ansteuerungen auf das Optimierungsziel zu berechnen [Ser09a, S. 114]. Meist wird ein nichtlineares Modell verwendet. Dann wird das Verfahren als nichtlineare modellbasierte prädiktive Regelung bezeichnet [Bac05, S. 13]. Zudem wird ein Vorhersagefenster eingesetzt, um echtzeitfähig ein prädiktives optimales Energiemanagement zu berechnen [Kha10, S. 152]. Dazu wird innerhalb des Vorhersagefensters der Leistungsbedarf des Antriebs vorhergesagt [Bac05, S. 11]. Durch die Prognose der rekuperierbaren Energie und des Energiebedarfs für den Antrieb kann das Energiemanagement schon vorab angepasst werden, um das Optimierungsziel besser zu erreichen [Böc08, S. 18]. Der zukünftige Leistungsbedarf des Antriebs wird mit Hilfe eines Fahrermodells und den zukünftigen Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- und Steigungsverläufen prädiziert. Hierzu kann Telematik, die Verknüpfung von Telekommunikation und Informationsverarbeitung eingesetzt werden, wobei bspw. dreidimensionale Karten mit Steigungsverläufen, Geschwindigkeitsbegrenzungen, Kurveninformationen und Verkehrsflussinformationen verwendet werden [Bac05, S. 10–11].

Das Vorgehen bei der modellprädiktiven Regelung sieht folgendermaßen aus: Für einen fortschreitenden Prädiktionszeitraum wird die Steuertrajektorie berechnet. Anschließend wird nur die berechnete Steuerungsgröße für den aktuellen Zeitpunkt den Antriebsstrangkomponenten vorgegeben. Dann wird der Prädiktionszeitraum wieder um einen Berechnungsschritt in die Zukunft verschoben [Ser09a, S. 114]. Es wird eine erneute Prädiktion mit anschließender Optimierung gestartet. Diese bringt weiter vorausliegende Straßenabschnitte in den Bereich der Prädiktion und stellt sicher, dass auftretende Störungen durch Fehler in der Prädiktion mit einbezogen werden [Bac05, S. 12]. Die Vorhersage wird für jeden Berechnungsschritt aktualisiert. Der Vorhersagezeitraum bleibt so immer gleich groß und schreitet bei jedem Berechnungsschritt um eine Zeiteinheit voran [Ser09a, S. 94–95]. Daher wird von einem gleitenden Horizont gesprochen [Bac05, S. 15].

Mit dem Verfahren ist es relativ schwierig, gute Vorhersagen über den zukünftigen Leistungsbedarf bei langen Vorhersagezeiträumen zu machen [Ser09a, S. 94–95]. Es muss zwischen Optimierungszeitraum, Prognoseunsicherheit und Einsparpotential abgewogen werden [Büc08, S. 66]. Mit wachsendem Prognosehorizont nähert sich die Steuertrajektorie dem Optimum an, allerdings steigen gleichzeitig die Prognoseunsicherheiten stark an. Mit sinkender Genauigkeit der prädizierten zukünftigen Fahrzustände verschlechtert sich das Ergebnis der Ansteuerung hinsichtlich des Optimierungsziels [Bac05, S. 68]. Der Prädiktionshorizont beträgt bspw. 50s [Bac05, S. 137]. Ab diesem Zeitraum kann das theoretische Einsparpotential bei dem in der Arbeit betrachteten parallelen Hybrid kaum noch

erhöht werden kann. Der sinnvolle Prädiktionszeitraum hängt von dem betrachteten System ab [Büc08, S. 66].

Für die Berechnung der optimalen Steuertrajektorie innerhalb des Prädiktionszeitraums kann dynamische Programmierung im Fahrzeug implementiert werden [Ser09a, S. 94–95], [Sci07, S. 67], [Bac05, S. 12]. Somit kann, allerdings unter extrem hohem Berechnungsaufwand, die optimale Lösung gefunden werden [Ser09a, S. 94–95]. Wenn das mathematische Modell genau das Systemverhalten wiedergibt, keine Störungen vorliegen und das Optimierungsproblem über einem unendlichen Zeitintervall gelöst werden könnte, würde die berechnete Steuerabfolge zu einer optimalen Steuertrajektorie führen. Aufgrund von Modellungenauigkeiten und Störeinflüssen stimmt der prädizierte Zustand jedoch nicht komplett mit der Realität überein, insbesondere bei fortschreitender Prädiktionszeit [Bac05, S. 14]. In anderen Arbeiten wird quadratische Programmierung, bei der eine quadratische Kostenfunktion statisch optimiert wird, für den prädizierten Zeitraum verwendet [Nui03, S. 4–5]. Auch lineare Programmierung wird für die optimale modellprädiktive Regelung bei Arbeiten wie von [Sal05, S. 22–23] eingesetzt. Hier wird ein Modell stark vereinfacht, um es linear zu beschreiben. Neben Optimierungsansätzen gibt es auch Veröffentlichungen, bei denen eine modellbasierte Prädiktion stattfindet und auf Basis dieser regelbasiert die Leistung verteilt wird [Fu11, S. 2114], [Böc08, S. 110]. Neben Telematikdiensten ist es zur Prädiktion der Antriebsleistung auch möglich, mit Hilfe von neuronalen Netzen eine Vorhersage zu machen [Ars04, S. 485–487]. Die Vorhersage für die dynamische Programmierung zur Bestimmung der optimalen Leistungsverteilung kann auch über eine hierarchische Clusteranalyse der vergangenen Fahrten aufgestellt werden [Lar14, S. 10–11].

2.3.3 Äquivalenzwertverfahren

Beim Äquivalenzwertverfahren wird jeweils für den aktuellen Zeitschritt die optimale Leistungsverteilung berechnet [Ser09a, S. 103]. Dazu wird eine Gütefunktion minimiert, die bspw. bei einem autarken parallelen Hybrid aus zwei Summanden besteht. Ersterer beinhaltet den Kraftstoffverbrauch des Verbrennungsmotors und zweiter den äquivalenten Kraftstoffverbrauch der Batterie, welche die Leistung für den Elektromotor bereitstellt [Ser09a, S. 14–15]. Es wird somit eine um den Äquivalenzwert gewichtete Kostenfunktion für Energie aus dem Speicher und Energie aus Kraftstoff aufgestellt [Kop08, S. 18], [Sci04, S. 354]. Der Äquivalenzwert beinhaltet die Kraftstoffmenge, die verbraucht wird, um die gespeicherte elektrische Energie zu generieren [Rei10a, S. 27]. Es wird somit der virtuelle Kraftstoffverbrauch, der bei der Nutzung der Batterie entstehen würde, berechnet. Dabei wird berücksichtigt, woher die Energie zum Laden der Batterie kommt. Bei einem autarken parallelen Hybrid ist das über den Verbrennungsmotor oder über regeneratives Bremsen [Ser09a, S. 14–15]. Das Verfahren mit Äquivalenzwert ist generisch und kann für jeden Energiefluss in jeder Art von Hybridantriebsstrang verwendet werden. Um den Zusammenhang zwischen Kraftstoffmassenfluss und elektrischer Leistung aufzustellen, müssen die genaue Antriebskonfiguration und die Wirkungsgrade der Antriebskomponenten bekannt sein [Ser09a, S. 104]. Die Gütefunktion kann bspw. um einen weiteren äquivalenten Massenstrom für einen zweiten elektrischen Speicher oder den Massestrom eines zweiten Verbrennungsmotors, neben dem Massestrom des Verbrennungsmotors und dem äquivalenten Massestrom des ersten elektrischen Speichers bei einem seriellen Hybrid erweitert werden [Pis05a, S. 68–69], [Pis05, S. 1827–1828]. Die sinnvolle Bestimmung des Äquivalenzwerts hat Auswirkungen darauf, wie kraftstoffoptimal die Leistungsverteilung ist [Mus05b, S. 1821]. Bei einem zu hohen Äquivalenzwert wird die Batterie zu

viel geladen und das Kraftstoffeinsparungspotenzial der Hybridisierung nicht genutzt. Bei einem zu niedrigen Wert wird die Batterie komplett entladen [Ser09a, S. 105], [Riz14, S. 7].

Das Verfahren wurde zuerst für einen parallelen Hybrid in [Pag00, S. 709] vorgestellt. Darin werden zwei Fälle beschrieben. Erstens, die Batterie wird entladen. Hierfür wird berechnet, welche Kraftstoffmenge nötig ist, um die Batterie über den Verbrennungsmotor und Generator wieder zu laden. Zweitens, die Batterie wird geladen. Für diesen Fall wird berechnet, wie viel Kraftstoff eingespart werden kann, weil die Batterie später einen Leistungsanteil des Verbrennungsmotors zur Gesamtantriebsleistung bereitstellen kann. In beiden Fällen ist vorab der Wirkungsgrad nicht bekannt, bei dem der Verbrennungsmotor Leistung einspart, bzw. die Batterie wieder geladen wird. Daher wird meist mit durchschnittlichen Wirkungsgraden der Komponenten gerechnet [Pag02, S. 2078], [Xu10, S. 137–143]. Das Verfahren erlaubt es, auch andere Optimierungsgrößen zu minimieren. Bei [Sto11, S. 2952–2954] werden bspw. die CO₂-Emissionen für einen Plug-in-Hybrid minimiert. Dazu wird die Summe der äquivalenten CO₂-Emissionen durch den Verbrennungsmotor und die äquivalenten CO₂-Emissionen der Batterie minimiert. Die äquivalenten Emissionen der Batterie setzen sich zusammen aus den Emissionen, die beim Laden der Batterie am Netz und durch das Laden der Batterie durch den Verbrennungsmotor entstehen. Bei [Jör09, S. 143–156], [Kle03, S. 52–57] werden für einen autarken parallelen Hybrid die Summe der Verlustleistungen im Antriebsstrang ohne Speicher und der äquivalenten Verlustleistungen des Speichers, die durch Lastpunktanhebung und Rekuperation beim Laden des Speichers entstehen, minimiert. Auch mehrere Optimierungsziele können verfolgt werden [Mus05a, S. 3879]. Mit dem Gewichtungsfaktor kann eingestellt werden, ob der Kraftstoffverbrauch oder die NO_x-Emissionen bei der Minimierung stärker gewichtet werden sollen [Mus05a, S. 3879]. Um den Ladezustand der Batterie in bestimmten Grenzen zu halten, kann eine nichtlineare ladezustandsabhängige Straffunktion als Gewichtungsfaktor in die Gütefunktion eingefügt werden [Pag01, S. 5066], [Pis07, S. 511–512], der sogar während der Fahrt angepasst werden kann [Che05, S. 428].

Eine optimale Leistungsverteilung kann bei dem Verfahren nur gefunden werden, wenn der gesamte Fahrzyklus und somit alle Zustandsdaten bekannt sind und somit der optimale Äquivalenzwert für den jeweiligen Zeitschritt berechnet wird [Rei10a, S. 27], [Sci07, S. 67], [Riz14, S. 7], [Mus05b, S. 1820], [Ser09b, S. 3966–3967], [Fad11, S. 3271]. Am einfachsten ist es, einen konstanten Äquivalenzwert anzunehmen, der für alle Fahrzustände gilt [Sci07, S. 67]. Der Äquivalenzwert kann aber auch dynamisch während der Fahrt angepasst werden [Ser09a, S. 14–15], damit eine quasi optimale Leistungsverteilung erzielt wird [Riz14, S. 7], [Pis07, S. 512]. Nach [Ono11, S. 3], [Fu11, S. 2113] und [Riz14, S. 7] gibt es drei Methoden den Äquivalenzkostenfaktor anzupassen: Über Fahrmustererkennung [Sci04, S. 355–356], entsprechend vergangener Zustandsdaten [Mus04, S. 5–7], [Mus05b, S. 1821], [Pis07, S. 512], wie über den aktuellen Ladezustand [Koo04, S. 4076], [Koo05, S. 774–775], [Kes08, S. 3437], [Ono10, S. 4–5], [Cas11, S. 207–210] oder über Fahrzyklusvorhersagen. Der Vergleich der verschiedenen adaptiven Äquivalenzwertverfahren nach [Ono11, S. 6] zeigt, dass die Optimierungsziele bei adaptiven Verfahren, bei denen nur der Ladezustand zurückgeführt wurde, ähnlich gut erreicht werden, wie bei Verfahren mit Prädiktion. Dies wurde allerdings nur für solche Fahrzyklen bewiesen, bei denen die Ladezustandsgrenzen der Batterie nicht erreicht wurden.

Ein typisches Problem bei Verfahren, die Äquivalenzkosten verwenden, ist, dass es zu einem Flattern der Steuerungsgrößen kommen kann. Das bedeutet, die Leistungsvertei-

lung schwingt sehr schnell zwischen zwei verschiedenen Zuständen hin und her. Der Grund dafür ist, dass der äquivalente Kraftstoffverbrauch bei zwei verschiedenen Betriebspunkten sehr ähnlich ist und kleine Abweichungen vom Fahrzustand dazu führen, dass einer der beiden Betriebspunkte abwechselnd ein bisschen besser oder schlechter als der andere ist. Die Folge ist ein sehr schnelles Wechseln zwischen Betriebspunkten. Dies kann zu Komforteinbußen für den Fahrer führen [Ser09a, S. 111].

2.3.4 Regelbasierte Verfahren

Die ersten Algorithmen für das Energiemanagement in Hybridfahrzeugen basierten auf regelbasierten Strategien [Sci07, S. 60], die aus einer Menge von Regeln bestehen, welche die Leistungsverteilung festlegen [Ser09a, S. 118–119], [Kop08, S. 17]. Auch heute noch ist dies das am weitesten verbreitete Energiemanagementverfahren in Serienfahrzeugen [Ser09a, S. 119], [Hof10, S. 212], [van12, S. 548], [Kop08, S. 17].

Regelbasierte Strategien, auch heuristische Strategien genannt, basieren nicht auf Modellen oder formalen Beschreibungsmethoden [Ser09a, S. 118–119]. Stattdessen werden die Regeln auf Basis der Erfahrung des Systementwicklers zu dem voraussichtlichen Verhalten des Antriebsstrangs aufgestellt [Kok06, S. 93], [Kha10, S. 150], [Sci07, S. 60], [Ser09a, S. 118–119], [Kop08, S. 17], [Büc08, S. 54–55]. Dazu werden Analysen zum Leistungsfluss im Fahrzeug durchgeführt, Wirkungsgradkennfelder betrachtet und Sachverstand genutzt. [Sal07, S. 2394], [Kha10, S. 150], [Ser09a, S. 119]. Die Regeln werden meist durch Kennfelder implementiert, die die Leistungsverteilung in Abhängigkeit der Fahrzustände und Zustandsdaten vorgeben [Sal07, S. 2394], [Sci07, S. 69], [Ser09, S. 15]. Solche Strategien sind allerdings meist in der Komplexität, Funktionalität und ihrem Optimierungspotential stark begrenzt [Kok06, S. 93], [Ser09a, S. 119]. Der Zeitaufwand, um regelbasierte Verfahren aufzustellen, hängt von der Anzahl der aufgestellten Regeln ab [Kop08, S. 17].

Ein Extremfall für eine regelbasierte Strategie für einen seriellen Hybriden liegt vor, wenn die Motor-Generator-Einheit immer den aktuellen Leistungsbedarf des Antriebs deckt, so dass theoretisch auf den elektrischen Speicher verzichtet werden kann [Göh97, S. 26–27]. Als „Power Follower“ Methode wird auch für parallele Hybride das Regelwerk beschrieben, bei dem der Verbrennungsmotor primär die Antriebsleistung bereitstellt und nur in Ausnahmefällen, wie bei sehr hohen Antriebsleistungen, die Batterie mit dem Elektromotor unterstützt [Sal07, S. 2395]. Ein anderer Extremfall für einen seriellen Hybrid liegt vor, wenn der Verbrennungsmotor nur auf Linien oder sogar einem Punkt seines Kennfeldes betrieben wird [Göh97, S. 26–27].

Eine sehr einfache Strategie ist eine ladezustandsabhängige Regelung, auch bekannt als „Thermostat-Methode“. Dabei wird der Verbrennungsmotor gestartet, wenn der minimale Ladezustand des Speichers unterschritten wird und abgeschaltet, wenn ein maximaler Ladezustand überschritten wird [Göh97, S. 33], [Ehs05, S. 245–246], [Sal07, S. 2394–2395], [Jal97, S. 690], [Fad11, S. 3274]. Der Nachteil dieser Regelung ist, dass der Verbrennungsmotor vollkommen unabhängig vom momentanen Leistungsbedarf des elektrischen Antriebs Energie liefert, was zur verlustbehafteten Zwischenspeicherung von großen Energiemengen führt [Göh97, S. 33].

Bei den ersten regelbasierten Strategien wurden einfache Regeln wie bspw. „der Verbrennungsmotor soll bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten bis zu einer Grenzggeschwindigkeit ausgeschaltet sein“ implementiert [Sci07, S. 60]. Meist werden die Betriebsmodi in Abhängigkeit von Fahrzeuggeschwindigkeit und erforderlicher Antriebs-

leistung ausgewählt [Hof10, S. 212]. Neben der geforderten Antriebsleistung und Fahrzeuggeschwindigkeit wird meist der Ladezustand berücksichtigt [Sci07, S. 69]. Bspw. werden einfache Regeln in Abhängigkeit der drei Zustandsgrößen für einen seriellen Hybrid [Ehs05, S. 243] oder für einen parallelen Hybrid [Ehs05, S. 262–265], [Böc08, S. 67–73] aufgestellt. Zudem können weitere Daten aus der Fahrumgebung und über den Fahrer verwendet werden, um die Leistungsverteilung festzulegen [Fug09, S. 81–96]. Neben Kennfeldern werden meist Zustandsautomaten mit Schwellwerten verwendet, um den Betriebsmodus festzulegen [Egl11, S. 141–142], [Phi00, S. 298], [Pis07, S. 510–511].

Damit der Energiespeicher einen idealen Ladezustand beibehält, wird im adaptiven Energiemanagement der Betriebspunkt des Verbrennungsmotors entsprechend der Energiebilanz am Energiespeicher regelbasiert verschoben [Böc08, S. 75–76]. Entsprechend eines Regelwerks kann die Leistungsverteilung im Antriebsstrang auch so vorgenommen werden, dass immer ein Ladezustand, bei dem die gesamte Bremsenergie bei dem aktuellen Fahrzeugzustand rekuperiert werden kann, erreicht wird [Jör09, S. 122–129]. Zudem gibt es prädiktive regelbasierte Strategien, die z.B. Daten zu den zukünftigen Fahrwiderständen verwenden [Kha08, S. 147–148].

2.3.5 Fuzzy Logik

Bei der Fuzzy-Logik wird davon ausgegangen, dass ein Element nicht eindeutig einer Menge zugeordnet werden kann, sondern es nur eine graduelle Zugehörigkeit gibt [Nis14, S. 4]. Bei einigen Steuerungsproblemen, insbesondere bei solchen mit sehr vielen Kriterien und Randbedingungen als Eingangsgrößen für das Energiemanagement, kann nicht alles durch harte Grenzen bzw. Schwellwerte beschrieben werden [Kha10, S. 164], [Hof10, S. 212]. Daher wird bei vielen regelbasierten Strategien Fuzzy Logik eingesetzt [Fad11, S. 3271]. Durch die graduelle Zugehörigkeit ergeben sich unscharfe Mengen, die als Fuzzy Sets bezeichnet werden [Nis14, S. 4]. Die unscharfe Zugehörigkeit eines Elements zu einer Menge wird über eine Zugehörigkeitsfunktion abgebildet. [Nis14, S. 5]. Entsprechend der Zugehörigkeitsfunktionen der Zustandsdaten (Abbildung 2.7, oben und unten links) und den Regeln (Abbildung 2.7, rechts unten) wird die Leistungsverteilung festgelegt.

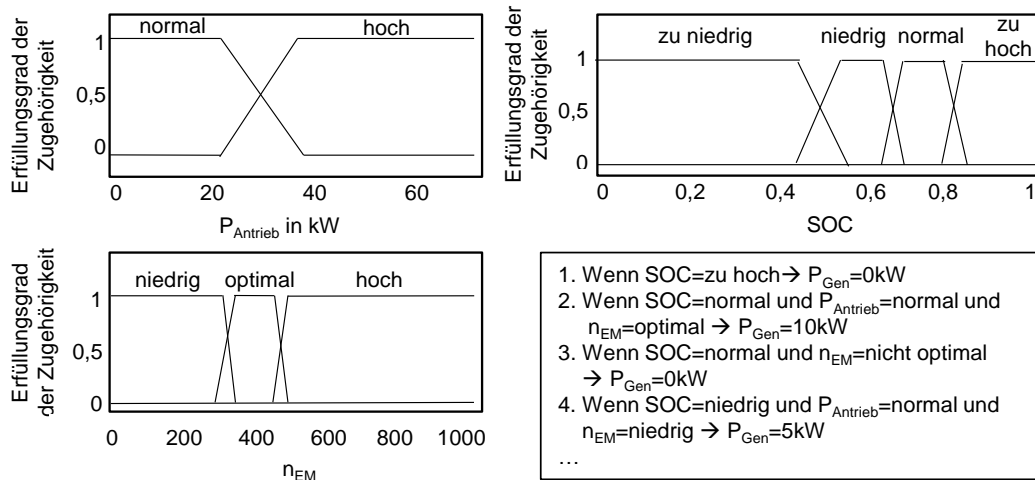


Abbildung 2.7: Zugehörigkeitsfunktionen und Regeln bei einer Fuzzy Logik Strategie [Sal b, S. 526–527], [Sch02, S. 463–465]

Im ersten von vier Schritten des Vorgehens der Fuzzy Logik, der Fuzzification, wird der Gradient der Zugehörigkeit für die Eingangsgrößen bestimmt [Sch02, S. 464]. Bei [Bau00, S. 63] wird über eine Zugehörigkeitsfunktion abgebildet, wie der Ladezustand der Batterie mit den Bezeichnungen „sehr niedrig“, „niedrig“, „mittel“, „hoch“ und „sehr hoch“ zugehörig ist. Bei einem Ladezustand von 0,875 wird er zu 25% zu "hoch" zugeordnet und zu 75% zu "sehr hoch". Im zweiten Schritt wird für die Eingangsgrößen der Erfüllungsgrad der Regeln, die befolgt werden müssen, berechnet [Sch02, S. 464]. Mit einer Regel wird abgebildet, bei welcher Zugehörigkeit einer oder mehrerer Eingangsgrößen welche Zugehörigkeit einer oder mehrerer Ausgangsgrößen entsteht. Ein einfaches Beispiel einer Regel ist: „Wenn das Moment, das der Elektromotor bereitstellen soll, „sehr hoch und positiv“ ist und der Ladezustand der Batterie „mittel“ ist, soll das tatsächlich vom Elektromotor geforderte Moment „mittelhoch positiv“ sein.“ [Bau00, S. 63]. Meist werden sehr viele Regeln untersucht. Zwischen den Fuzzy Sets werden bspw. bei [Bau00, S. 62] insgesamt 847 Regeln gebildet, welche die Betriebsstrategie für einen parallelen Hybrid zur Lastpunktanpassung abbilden. Die Regeln werden meist auf Basis von Expertenwissen aufgestellt [Fad11, S. 3271], [Fad11, S. 3271]. Sie können aber auch durch die Auswertung einer zuvor angewandten Optimierungsmethode abgeleitet werden [Zhu06, S. 54–59]. Im dritten Schritt werden die Auswirkungen der Regeln mit dem jeweiligen Erfüllungsgrad multipliziert [Sch02, S. 464]. Defuzzification, der vierte und letzte Schritt beinhaltet die Berechnung der Ausgangswerte entsprechend aller gewichteten Folgen der Regeln [Sch02, S. 464]. Dieser Schritt ist zeitintensiv und benötigt viel Speicher auf einem Steuergerät [Kha10, S. 150].

Fuzzy Logik kann mit verschiedensten Eingangsgrößen und Optimierungszielen verwendet werden [Far05, S. 2–3], [Bat05, S. 696–697], [Fad11, S. 3274–3275]. Bspw. kann eine Fahrsituationserkennung [Lan05, S. 926] die den Straßentyp, den Fahrertyp, die Fahrsituation und den aktuellen Betriebsmodus erkennt, als Eingangsgröße der Fuzzy Logik dienen, um die Leistungsverteilung im parallelen Hybrid möglichst kraftstoffeffizient vorzunehmen [Won05, S. 935]. Für die Wahl des Betriebsmodus können auch einfache Regeln mit Grenzwerten aufgestellt und dann die Leistungsverteilung innerhalb der Betriebsmodi mit Fuzzy-Logik berechnet werden [Haj07, S. 787–789].

2.3.6 Ableitung von regelbasierten Strategien mit Optimierungsverfahren

Um eine regelbasierte Strategie aufzustellen, können unterschiedliche Optimierungsverfahren genutzt werden [Gru10, S. 127]. Hierfür kann dynamische Programmierung verwendet werden (Abbildung 2.8) [Ser09a, S. 15], [Lin03, S. 847], [Zhu06, S. 54–59], [Bia11, S. 18–19], [Bar04, S. 190]. Allerdings ist der Ableitungsprozess dann sehr zeitintensiv [Ser09a, S. 94]. Außerdem kann auch offline der optimale Äquivalenzkostenfaktor berechnet werden, der anhand von Regeln anschließend online bei der Festlegung der Betriebsmodiwechsel und der Leistungsverteilung in den Betriebsmodi berücksichtigt wird [Hof07, S. 78–84].

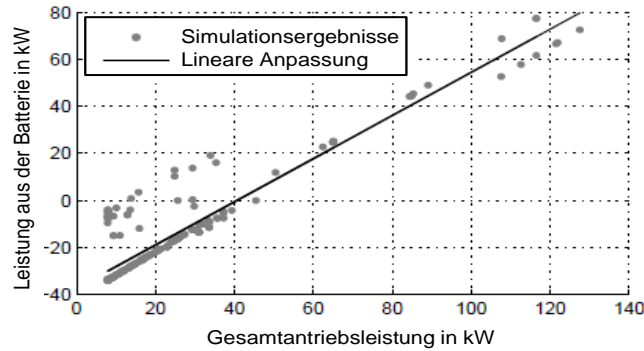


Abbildung 2.8: Ableitung von Regeln zur Leistungsbereitstellung der Batterie in Abhängigkeit von der Gesamtantriebsleistung bei einem leistungsverzweigten Hybrid aus der dynamischen Programmierung [Bia11, S. 19]

Die wesentliche Idee hinter der stochastischen dynamischen Programmierung ist, dass die Leistungsverteilung nicht für einen bestimmten Fahrzyklus optimiert wird, sondern für eine Menge an zufälligen Fahrzyklen. Durch stochastische dynamische Programmierung kann ein quasi-optimales Regelwerk im Fahrzeug erzeugt werden und im Fahrzeug, durch Verwendung von statischen Kennfeldern für Steuerungsgrößen abhängig von Zustandsgrößen, implementiert werden. Um die Kennfelder zu erhalten, wird das Optimierungsproblem mit einem unendlich langen Zeithorizont gebildet und mit der stochastischen dynamischen Programmierung gelöst [Ser09a, S. 95], [Lin04, S. 4711–4713], [Sch05, S. 165–166], [Tat08, S. 1411]. Das Verfahren kann allerdings nur angewendet werden, wenn die Anzahl an Zustandsvariablen gering ist [Sch05, S. 165]

Das Vorgehen der stochastischen dynamischen Programmierung gliedert sich in fünf Schritte [Ser09a, S. 98]:

1. Fahrzyklusdaten aufzeichnen
2. Zustands- und Steuerungsvariablen diskretisieren
3. Stochastisches Modell (Markov-Kette) generieren, um eine Abfolge von zufälligen Leistungsbedarfen zu erzeugen
4. Stochastisches dynamisches Optimierungsproblem für alle möglichen Kombinationen von Zustands- und Steuerungsvariablen lösen und in Kennfeldern abspeichern
5. Kennfeldbasierte Regelung im Fahrzeug implementieren

Werden neben den Fahrzyklusdaten, Zustandsdaten zur GPS-Position und Verkehrsflussinformation verwendet, um das Regelwerk über die stochastische dynamische Programmierung aufzubauen, wird dem Optimierungsziel näher gekommen [Joh05, S. 371]. Für eine feste Busstrecke, die kaum variiert, können relativ gute Ergebnisse mit der stochastischen dynamischen Programmierung erreicht werden [Elb14, S. 64–73].

Zur Regelableitung können auch genetische Algorithmen genutzt werden. Genetische Algorithmen imitieren den biologischen Prozess der Evolution mit dem Ziel der globalen Maximierung einer Funktion. Für die iterative Optimierungsprozedur genetischer Algorithmen wird eine Bevölkerung von Individuen gebildet. Die Chromosomenreihe jedes Individuums besteht aus einer Reihe von Variablenwerten. Genetische Algorithmen starten mit einer Bevölkerung und unternehmen durch iterative Selektion, Rekombination und Manipulation eine graduelle Verbesserung bis zur Bestimmung eines guten lokalen oder sogar globalen Maximums. Für die Selektion wird aus der Bevölkerung eine stochastische Auswahl von Individuen getroffen. Hierbei werden mit einer höheren Wahrscheinlichkeit Indi-

viduen mit einem hohen Maß der Anpassung ausgewählt. Die ausgewählten Individuen werden rekombiniert, so dass neue Individuen aus zufällig gewählten Paaren durch Chromosomenaustausch geschaffen werden. Im letzten Schritt wird die neue Generation von Individuen einer Mutation unterzogen, wobei einzelne Chromosomen mit relativ geringer Wahrscheinlichkeit verändert werden. Ein Iterationsschritt endet somit mit einer neuen Bevölkerung von Individuen, die die Grundlage der nächsten Iteration bildet [Pap06, S. 58–59], [Kha10, S. 164]. Mit genetischen Algorithmen können beschränkte nichtlineare Optimierungsprobleme gelöst werden. Das liegt daran, dass ein genetischer Algorithmus genauer den Lösungsraum untersucht als ein gradientenbasiertes Verfahren [Kha10, S. 152]. Zudem können genetischen Algorithmen gut eingesetzt werden, wenn mehrere Optimierungsziele gleichzeitig verfolgt werden [Pal07, S. 3006]. Genetische Algorithmen können eingesetzt werden, um Schwellwerte für die Leistungsverteilung zu bestimmen [Pic01, S. 435–437], [Pal07, S. 3004–3006].

Mit Hilfe von neuronalen Netzen können ebenfalls Regeln abgeleitet werden. Ein neuronales Netz ist eine Abbildungsvorschrift, um den Zusammenhang zwischen Eingabe- und Ausgabevektoren abzubilden. Dazu verknüpfen neuronale Netze einfache Prozessoren, die nur einfache Rechnungen durchführen können. Die Verbindung zweier Prozessoren wird durch ein Gewicht bewertet. Durch die Modifikation der Gewichtungen kann das Ein- und Ausgabeverhalten des Netzes in die gewünschte Form gebracht werden [Sch97, S. 4]. Neuronale Netze können den Zusammenhang zwischen Steuerungsparametern und Systemzuständen modellieren [Sch97, S. 16]. Dabei können vielen Eingangsgrößen berücksichtigt werden [Kha10, S. 164]. Ein neuronales Netz kann durch Training entsprechend der Optimierungsziele adaptiert werden [Kha10, S. 151], [Moh07, S. 3]. Neuronale Netzwerke können online im Fahrzeug oder offline trainiert werden, wobei sie für ein online Training viel Speicherplatz benötigen [Kha10, S. 151]. Da es zudem Unsicherheit bezüglich der Reproduzierbarkeit des Fahrzeugverhaltens bei neuronalen Netzen gibt und das zielgerichtete Trainieren nicht mit einer Garantie für ein in Zukunft unter allen Umständen zuverlässiges Regelverhalten gleichzusetzen ist [Wil09, S. 20], sollten neuronale Netze nicht direkt online im Fahrzeug eingesetzt werden. Neuronale Netze können auch mit Fuzzy-Logik zu einer Neuro-Fuzzy Steuerung verbunden werden [Kha10, S. 150]. Bspw. können Regeln der Fuzzy Logik über ein neuronales Netz ermittelt werden [Moh05, S. 253–254].

2.3.7 Marktbasierte Verfahren

Ziel der marktbasierter Verfahren ist es, eine „Plug-and-Play Fähigkeit“ von Komponenten zu ermöglichen, um eine Wiederverwendbarkeit des Energiemanagements über Plattformgrenzen zu erreichen [Sch07, S. 11], [Eng09, S. 82]. Dazu soll es einen zentralen Energiemanager geben, der für verschiedenste Fahrzeuge verwendet werden kann [Gra04, S. 47], [Sch07, S. 11]. Über eine Schnittstelle zwischen den Komponenten und dem zentralen Energiemanagement-Koordinator sollen nur die für das Energiemanagement relevanten Daten übertragen werden [Sch07, S. 11–13]. Somit wird über ein einheitliches Vergleichsmaß die Leistungsverteilung vorgegeben [Büc08, S. 27]. Aus wirtschaftswissenschaftlicher Sicht findet ein Markt beim Energiemanager statt, auf dem es Anbieter (Erzeuger) und Nachfrager (Verbraucher) von Energie gibt [Büc08, S. 68], [Gra04, S. 47–49].

In [Sch07, S. 11–13] teilen die Verbraucher im Bordnetz eines konventionellen Fahrzeugs ihre Klassen und Prioritätskennzahlen dem Energiemanagement mit. Entsprechend der Einordnung der Komponenten wird die Leistungszuteilung im Energiemanagement festge-

legt [Sch09, S. 69–96]. Auch bei [Gra04, S. 47–49] wird ein Verbrauchermanagement für ein Bordnetz eines konventionellen Fahrzeugs vorgestellt. Die Nachfrage stellen Preis-/Mengenkurven der Verbraucher dar, die entsprechend des aktuellen Energiebedarfs und der Priorität der Verbraucher an den Power Trader gesendet werden [Gra04, S. 49]. Anhand der Preis-/Mengenkurven und dem Energieangebot von Generator und Batterie wird ein Preis im Power Trader ermittelt. Der Preis wird den Verbrauchern übermittelt, die selbstständig ihren Stromverbrauch einstellen. Da es das Ziel ist, die Spannung im Bordnetz auf einem Niveau zu halten, wird das Energieangebot der Batterie dementsprechend gestaltet [Gra04, S. 49].

Bei [Büc08, S. 68] wird ein Marktmodell für ein elektrisches Bordnetz eines konventionellen Fahrzeugs vorgestellt. Dabei werden Nachfragefunktionen für die Verbraucher, eine Angebotsfunktion des Generators und eine Angebots-/Nachfragefunktion für die Batterie aufgestellt (Abbildung 2.9). Die Nachfragefunktionen stellen den Nutzen der Verbraucher dar, der sich verändern kann, wie bspw. bei der Sitzheizung mit der Umgebungs- und Sitztemperatur [Büc08, S. 72–73]. Für die Energiebereitstellung des Generators wird eine Angebotsfunktion aufgestellt, die abhängig ist von den Kraftstoffkosten für die Bereitstellung der Leistung in dem Berechnungsschritt [Büc08, S. 74–75]. Die Nachfrage- und Angebotsfunktion der Batterie wird durch die maximale Lade- bzw. Entladeleistung der Batterie begrenzt [Büc08, S. 76]. Ab einem Mindestangebotspreis p_0 wechselt die Batterie die Rolle von Anbieter zu Nachfrager. Der Mindestangebotspreis entspricht dem Angebotspreis, bei dem der Generator aktuell die größtmögliche Leistung abgeben kann [Büc08, S. 71]. Die Batterie handelt somit nicht unabhängig. Es liegt ein Allokationsproblem vor, bei dem die vom Generator angebotene elektrische Leistung von den elektrischen Verbrauchern kontinuierlich nachgefragt wird [Büc08, S. 71].

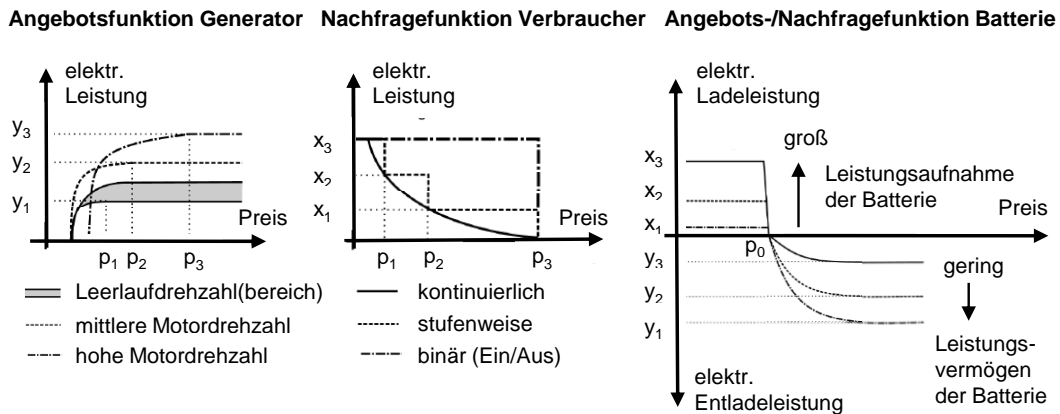


Abbildung 2.9: Angebots- und Nachfragefunktionen für Leistung in einem Berechnungsschritt zu Preisen [Büc08, S. 73–77]

Durch Addition aller Angebots- und Nachfragefunktionen wird bei einem Marktgleichgewicht, also dann, wenn die gleiche Leistung aufgenommen wie abgegeben wird, ein Preis ermittelt (Abbildung 2.10). Entsprechend dieses Preises bekommen die Komponenten Leistungsvorgaben [Büc08, S. 77–78]. Bei dem Allokationsproblem wird entsprechend der Nutzen und Kosten eine optimale Lösung gefunden [Büc08, S. 79–80].

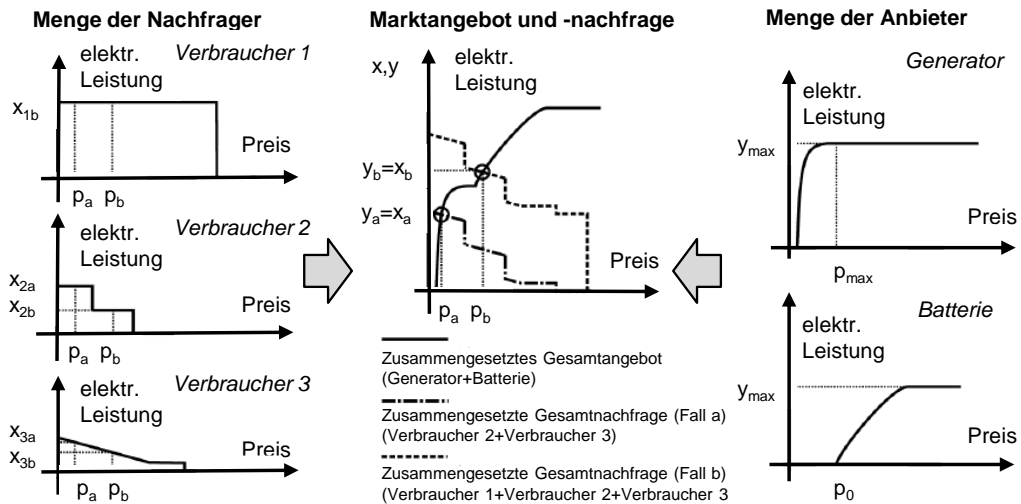


Abbildung 2.10: Ermittlung des Marktpreises [Büc08, S. 78]

Als weiteres Verfahren für die Energieverteilung im Bordnetz beschreibt Büchner [Büc08, S. 86] ein einseitiges Auktionsmodell, bei dem die von Generator und der Batterie angebotene elektrische Leistung von den elektrischen Verbrauchern als Bieter kontinuierlich nachgefragt wird. Dazu geben die Verbraucher dem Auktionator Gebotspreise, die mit Nachfrageleistungsmengen verknüpft sind. Die Gebote sind diskretisierte Nachfragefunktionen [Büc08, S. 87]. Beim Auktionator wird der Gleichgewichtspreis für die Gebote und ein konstantes Angebot ermittelt und somit die Energieverteilung berechnet [Büc08, S. 88–89].

Bei Engstle [Eng09, S. 84–95] wird regelbasiert die mechanische Leistungsverteilung im parallelen Hybrid zwischen Elektromotor und Verbrennungsmotor festgelegt. Dadurch wird bestimmt, welche Leistung der Elektromotor aus dem Bordnetz entnimmt bzw. als Generator im elektrischen Bordnetz bereitstellt. Für den Fall, dass der Generator im Bordnetz Leistung bereitstellt, werden im offenen Energiemarkt von Engstle [Eng09, S. 76] für das Bordnetz, analog zu Büchner [Büc08, S. 78], ebenfalls alle Kosten-Leistungs-Funktionen aufaddiert. Anschließend wird der Preis durch einen Nullstellenfindungsalgorithmus ermittelt. Der Marktpreis liegt dann vor, wenn die Summenfunktion gleich Null ist, weil die aufgenommene Leistung mit positivem Vorzeichen betrachtet wird und die abgegebene Leistung mit negativem Vorzeichen. Der Marktpreis legt die Zuteilung der zur Verfügung stehenden elektrischen Leistung auf die verschiedenen Verbraucher in jedem quasistationären Zeitpunkt fest.

Die Kosten-Leistungs-Funktionen bestehen aus teillinearen Kennlinien, die durch nur zwei Eckpunkte festgelegt sind [Eng09, S. 77] (Abbildung 2.11). Die Verbraucherkennlinien werden über die gewünschte Leistung L_1 und die minimale Leistung zur Erhaltung der Grundfunktion L_2 mit den Kosten K_1 und K_2 , welche die Priorität angeben, dargestellt [Eng09, S. 77]. Der DC-DC-Wandler wird als Zwischenhändler betrachtet, der durch seinen Wirkungsgrad beim Leistungstransfer von einer Spannungsebene auf eine andere ebenfalls Kosten verursacht [Eng09, S. 77]. Abhängig von der Betriebssituation des Generators (Normalbetrieb, Rekuperation), wird die Steigung der Kosten-Leistungs-Funktionen eingestellt [Eng09, S. 78]. Die maximale Leistung L_1 und L_2 bei der Leistungsaufnahme und -abgabe des Speichers wird durch den aktuellen Ladezustand bestimmt [Eng09, S. 78]. Zudem wird die Kosten-Leistungs-Funktion fahrsituationsabhängig verschoben. Im regulären Fahrbetrieb soll die Leistungsbereitstellung vornehmlich über den Speicher erfolgen, weil hier auch elektrische Leistung gespeichert wird, die

durch Rekuperation gewonnen wurde. Im Rekuperationsbetrieb soll hingegen die Leistung über den Generator bereitgestellt werden und, wenn möglich, direkt von den Bordnetzteilnehmern verbraucht werden, so dass keine Zwischenspeicherung nötig ist [Eng09, S. 80–81]. Die Gestaltung der Kosten-Leistungs-Funktionen von Generator und Speicher sind somit voneinander abhängig. Insgesamt handelt es sich daher bei dem Energiemanagement um ein Verbrauchermanagement.

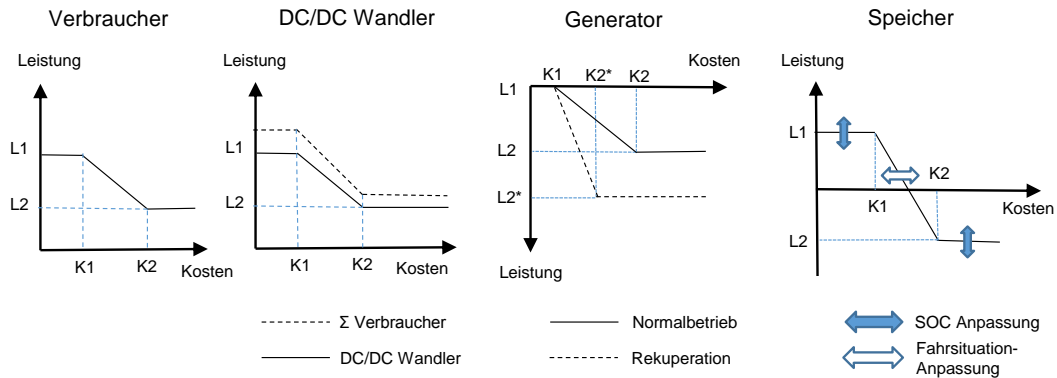


Abbildung 2.11: Kosten-Leistungs-Funktionen [Eng09, S. 77–79]

2.4 Gegenüberstellung der Energiemanagementverfahren

Energiemanagementverfahren können in kausale und nicht kausale Verfahren unterteilt werden [Sch09, S. 72]. Kausale Verfahren nutzen nur Wissen aus der Gegenwart und Vergangenheit [van12, S. 547]. Zudem können kausale Verfahren einen Vorhersagezeitraum nutzen, der jedoch nur einen Teil der Gesamtfahrt darstellt. Für nicht kausale Verfahren hingegen wird ein vollständiges korrektes Wissen über die Zukunft angenommen. Da dies während der Fahrt nicht möglich ist, können sie nicht im Fahrzeug eingesetzt werden [Sci07, S. 69], [Kha10, S. 151], [Ser09a, S. 12], [Ebb12, S. 13], [Fu11, S. 2113]. Diese Verfahren eignen sich nur für theoretische Untersuchungen und als Benchmark. Zu den nichtkausalen Verfahren gehört die Optimalsteuerung (analytisch berechnet oder numerisch mit der dynamischen Programmierung) und offline trainierte neuronale Netze, sowie genetische Algorithmen, wenn sämtliche Informationen über die Zukunft bereitgestellt werden [Kha10, S. 151–152].

Des Weiteren kann zwischen optimierenden und nichtoptimierenden Energiemanagementverfahren unterschieden werden. Für optimierende Verfahren werden meist Annahmen formuliert, um den Rechenaufwand zur Suche des Optimums zu senken [Sci07, S. 66]. Das hat allerdings zur Folge, dass die Lösung nur für die Annahmen optimal ist [Kha10, S. 151]. Des Weiteren kann nur ein Optimierungsziel oder es können mehrere gegeneinander gewichtete Optimierungsziele vorliegen. Für Nutzfahrzeuge ist das wichtigste Optimierungsziel die Minimierung der Betriebskosten, wie in der Einleitung erläutert. Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass die zu minimierende Gütefunktion nichtlinear ist. Das Minimum bzw. Optimum kann dann mit verschiedenen Suchverfahren, wie bspw. Gradientenverfahren bestimmt werden [Gru10, S. 76]. Entsprechend der Anzahl an Variablen und Nebenbedingungen sind verschiedenste weitere Verfahren zur Suche des Minimums bzw. Optimums einsetzbar [Pap06]. Unter den optimierenden Energiemanagementverfahren kann weiterhin zwischen solchen unterschieden werden, die das globale Optimum für ein Fahrprofil berechnen und solchen, die das lokale Optimum berechnen.

Ein globales Optimum kann nur mit nicht kausalen Energiemanagementverfahren berechnet werden [Gru10, S. 10], [Bia11, S. 4], [Ser09a, S. 12].

Bei lokal optimierenden Energiemanagementverfahren wird nicht ein globales Optimierungsproblem gelöst, sondern nur ein Teil des Gesamtoptimierungsproblems mit Daten aus der Vergangenheit, Gegenwart bzw. aus einer Vorhersage [Ser09a, S. 83], [Bia11, S. 4]. Somit wird nur ein lokales Optimum gefunden [Kop08, S. 17–18]. Lokale Optimierungsverfahren können im Fahrzeug implementiert werden [Bia11, S. 4], [Gru10, S. 10]. Daher handelt es sich um kausale Verfahren. Lokal optimierende Verfahren sind die modellprädiktive Regelung, Äquivalenzkostenverfahren und marktbasierende Verfahren [Ser09a, S. 83], [Bia11, S. 4], [Büc08, S. 79–80]. Äquivalenzkostenverfahren sind allerdings nur kausal und lokal optimierend, wenn zur Bestimmung des Äquivalenzfaktors nur gegenwärtige, vergangene und prognostizierte Daten verwendet werden und nicht der global optimale Äquivalenzfaktor gefunden wird. Ansonsten ist es ein global optimales nicht kausales Verfahren.

Nichtoptimierende Energiemanagementverfahren sind Verfahren, die nicht auf einer Minimierung oder Optimierung basieren, um die Steuerungsgrößen zu bestimmen, sondern nach vorher festgelegten Regeln die Leistungsverteilung im Fahrzeug vornehmen [Bia11, S. 4–5], [Ser09a, S. 15], [Ser09a, S. 83]. Es handelt sich bei den nichtoptimierenden Verfahren daher um kausale Verfahren, die im Fahrzeug eingesetzt werden können [Ser09a, S. 83], [Del04, S. 872–873], [Sal07, S. 2394], [Sci07, S. 69]. Zu den nichtoptimierenden Verfahren gehören die regelbasierten Verfahren, Fuzzy Logik und alle Verfahren, bei denen Regeln auf Basis von Optimierungsverfahren abgeleitet werden [Ser09a, S. 83], [Laj12a, S. 1–2]. Eine optimale Leistungsverteilung kann nicht erreicht werden [Ser09a, S. 15], [van12, S. 548], [Riz14, S. 5], [Kop08, S. 19], [Hof07, S. 76], [Bia11, S. 4–5]. Wie ähnlich die Leistungsverteilung zu einer optimalen Leistungsverteilung ist, hängt von dem Regelwerk ab [Kop08, S. 17]. Die auf Basis von Optimierung entstehenden regelbasierten Verfahren erreichen ähnliche Zielwerte wie optimierende Verfahren [Gru10, S. 123]. Allerdings wird bei der Ableitung von Regeln über Optimierungsverfahren ein spezifischer Fahrzyklus betrachtet. Je mehr die Fahrt in der Realität mit einem regelbasierten Energiemanagement von dem Auslegungsfahrzyklus abweicht, umso stärker ist die Abweichung der Zielwerte vom Optimum [Lin04, S. 4710], [Sci07, S. 69].

Energiemanagementverfahren können des Weiteren hinsichtlich des Problemlösungszeitpunkts unterschieden werden. Online Verfahren berechnen während der Fahrt die Steuergrößen, wohingegen dies bei offline Verfahren bereits vor Fahrtantritt durchgeführt wird. Globale Optimierungsverfahren, können nur offline berechnet werden, weil sie nicht kausal sind [Hof07, S. 76], [Kha10, S. 151]. Lokal optimierende Verfahren, wie Äquivalenzkostenverfahren, modellprädiktive Regelung und marktbasierende Verfahren sind Onlineverfahren [Laj12a, S. 1–2], [Kha10, S. 152], [Ser09a, S. 15], [Hof07, S. 76]. Bei nicht optimierenden Energiemanagementverfahren existieren im Fahrzeug für alle Nutzungsfälle feste Vorgaben zur Leistungsverteilung. Die Regeln können in Zustandsautomaten in Abhängigkeit von Zustandsdaten hinterlegt werden oder über kontinuierliche Regler, die über Kennlinien oder Regelkreise funktionale Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen herstellen, abgebildet werden [Wil09, S. 19]. Wird die Leistungsverteilung durch Kennfelder festgelegt, werden diese offline berechnet [Fad11, S. 3275]. Dann ist die Reaktion bei identischen Anforderungen und Bedingungen (Systemdaten, Restriktionen) über den gesamten Fahrzeugbetrieb gleich. Es handelt sich somit um ein statisches Energiemanagementverfahren, bei dem ein sich änderndes Systemverhalten durch Alterung der Komponenten oder starke Abweichungen der Betriebsführung (z.B. Fahrerver-

halten) nicht berücksichtigt wird [Büc08, S. 21]. Die ideale Leistungsverteilung kann sich aber verändern [Hof10, S. 213]. Nur Energiemanagementverfahren, die online die Leistungsverteilung berechnen, können während der Fahrt angepasst werden. Entsprechend der Anpassungshäufigkeit kann zwischen adaptiven und dynamischen Verfahren unterschieden werden. Adaptive Energiemanagementverfahren werden durch geeignete Beobachtungsmethoden des System- und Anforderungsverhaltens langsam angepasst [Büc08, S. 21], [Böc08, S. 19–20]. Ein dynamisches Verfahren ermittelt in kurzen Zeitschritten eine jeweils optimale Leistungsverteilung für den aktuelle Zeitpunkt oder einen Optimierungshorizont mit prognostizierten Daten [Büc08, S. 21].

Allerdings sind der Rechenaufwand und die nötige Speicherkapazität für online Energiemanagementverfahren im Fahrzeug auch deutlich höher [Gru10, S. 98], [Wil09, S. 19], [Kop08, S. 19]. Das liegt daran, dass zu jedem Zeitschritt eine neue Berechnung stattfinden muss [Bia11, S. 4]. Daher ist insbesondere für online optimierende Verfahren wichtig, dass diese möglichst rechenaufwandsarm gestaltet werden [Sci07, S. 69]. Modellprädiktive Regelung ist unter den online optimierenden Verfahren am rechenintensivsten [Ser09a, S. 114]. Im Vergleich dazu ist der Rechenaufwand von Äquivalenzkostenverfahren gering [Hof07, S. 76]. Beim Äquivalenzwertverfahren werden direkt die optimalen Werte für die Steuerungsgrößen entsprechend der Kostenfunktion gesucht. Liegen mehrere Freiheitsgrade und somit Steuerungsgrößen vor, handelt es sich um ein mehrdimensionales Optimierungsproblem. Der Rechenaufwand steigt überproportional mit der Anzahl der Freiheitsgrade [Ser09a, S. 110]. Bei marktbasierter Verfahren wird unabhängig von der Anzahl der Freiheitsgrade, die nur durch weitere Funktionen der Energiekomponenten repräsentiert werden, die Nullstelle der Summe aller Funktionen gesucht und der ermittelte Marktpreis in die einzelnen Funktionen der Komponenten eingesetzt, um die Leistungsverteilung festzulegen. Der Rechenaufwand steigt somit nicht so stark mit der Anzahl an Steuerungsgrößen.

Der größte Rechenaufwand ist jedoch bei den global optimierenden Verfahren, wie bei der dynamischen Programmierung nötig [Sci07, S. 64], [Sal07, S. 2402], [Hof07, S. 76]. Dieser steigt sogar exponentiell mit der Anzahl der Variablen (Zustands- und Steuerungsvariablen) [Lin01, S. 7], [Ans14, S. 360], [Ebb12, S. 13]. Im Gegensatz dazu liegt der geringste Rechenaufwand bei den regelbasierten Verfahren vor [Bia11, S. 4–5]. Das ist auch der primäre Grund, weswegen sie in Serienfahrzeugen fast ausschließlich verwendet werden [van12, S. 548].

Regelbasierte Verfahren sind meist leicht nachzuvollziehen und auf Steuergeräten im Fahrzeug zu applizieren [Hof10, S. 213], [Ser09a, S. 119], [Hof07, S. 76], [Kop08, S. 19]. Allerdings müssen, insbesondere mit steigender Anzahl berücksichtigter Zustandsdaten und Freiheitsgrade, sehr viele Regeln zeitaufwändig ermittelt werden [Hof07, S. 76], [Sal07, S. 2403], [Kop08, S. 19], [Riz14, S. 5]. Insbesondere ist ein hoher Kalibrierungsaufwand nötig, um Zielwerte nah an einem Optimum zu erreichen [Riz14, S. 12], [Sci07, S. 61], [Bia11, S. 4–5]. Werden Regeln mit Hilfe von Optimierungsverfahren, wie bspw. stochastischer dynamischer Programmierung oder mit Hilfe genetischer Algorithmen abgeleitet, ist der Zeitaufwand besonders hoch [Lin04, S. 4710], [Sal07, S. 2402]. Der größte Nachteil von nicht optimierenden Energiemanagementverfahren ist jedoch, dass sehr viele Regeln stark von dem gewählten hybriden Antriebssystem und der Topologie abhängen [Sci07, S. 64], [Hof07, S. 76]. Somit sind solche Verfahren nicht adaptierbar für andere Antriebsarchitekturen und verschiedene Ausprägungen der Antriebskomponenten und werden immer nur für ein konkretes Fahrzeug aufgestellt [Riz14, S. 12], [Ser09a, S. 119]. Für hybride Nutzfahrzeuge sollte aber aufgrund der Variantenvielfalt ein Energiemanage-

ment verwendet werden, das nicht grundlegend für jede Fahrzeugvariante neu entwickelt werden muss.

Die Entwicklung und Applikation von Optimierungsverfahren ist demgegenüber deutlich komplexer [Gru10, S. 98], [Wil09, S. 19]. Allerdings müssen auch deutlich weniger Parameter für jede Fahrzeugvariante eingestellt werden als bei nicht optimierenden Betriebsstrategien [Kop08, S. 17–19], [Hof07, S. 76]. Beim Äquivalenzverfahren und der modellprädiktiven Regelung müssen allerdings zur Kalibrierung die möglichen Leistungsflüsse und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Betriebskosten analysiert werden. Um den Äquivalenzwert zu ermitteln, müssen die Aufteilung der Leistungsbereitstellung zur Speicherung in den elektrischen Speichern aus den möglichen Quellen und die dabei entstehenden Kosten bekannt sein. Da dies vor Fahrtbeginn nicht möglich ist, müssen Annahmen vorgenommen werden, welche die Abweichung der Zielwerte vom Optimum stark beeinflussen. Als Energiemanagement, das wirklich flexibel ist, dem also unterschiedliche Energiekomponenten hinzugefügt werden können ohne zuvor die wahrscheinlichsten und kostengünstigsten Leistungsflüsse im Gesamtfahrzeug zu analysieren und ohne den Kern des Energiemanagement zu verändern, eignen sich beide Verfahren nicht. Vorteil des marktbasierenden Verfahrens ist, dass es Flexibilität zulässt. In den bisherigen Arbeiten stand allerdings das Verbrauchermanagement im Vordergrund. Es wird gezeigt, dass weitere Verbraucher flexibel im Energiemanagement berücksichtigt werden können, ohne dass sich das Energiemanagement grundlegend ändert. Es müssen lediglich weitere unabhängige Funktionen für jeden Verbraucher definiert werden. Die Funktionen des Generators und des Speichers sind allerdings nicht voneinander unabhängig beschrieben. Weitere oder andere Erzeuger können nicht flexibel hinzugefügt oder verändert werden.

Die beschriebene Gegenüberstellung der Verfahren wird in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Vergleich der Energiemanagementverfahren

Energiemanagementverfahren	Kausalität	Optimalität	Problemlösungszeitpunkt	Rechenaufwand im Fahrzeug	Kalibrierungsaufwand für mehrere Varianten
Optimalsteuerung	nicht kausal	global optimal	offline	sehr hoch	mittel
Modellprädiktive Regelung	kausal	lokal optimal	online	sehr hoch	mittel
Minimierung mit Äquivalenzkosten	kausal	lokal optimal	online	hoch	mittel
Regelbasierte Strategien	kausal	suboptimal	offline	niedrig	hoch
Fuzzy Logik	kausal	suboptimal	offline	niedrig	hoch
Ableitung von regelbasierten Verfahren mit Optimierungsverfahren	kausal	suboptimal	offline	niedrig	hoch
marktbasierende Verfahren für das Verbrauchermanagement	kausal	lokal optimal	online	mittel	niedrig

3 Vorgehen und wissenschaftliche Fragestellung der Arbeit

Das Vorgehen und zugleich die Struktur der vorliegenden Arbeit gliedert sich in die vier Teile: Problematik, Analyse, Lösung und Ergebnis/Diskussion (Abbildung 3.1). Die Arbeit basiert auf der im ersten Kapitel beschriebenen Problematik, dass eine Flexibilität des Energiemanagements nötig ist, um mit der enormen Fahrzeugvarianz bei hybriden Nutzfahrzeugen umzugehen und nicht für jede Fahrzeugvariante ein neues Energiemanagement zu entwickeln. Zudem soll durch das Energiemanagement das im Nutzfahrzeugmarkt wichtige Ziel der Betriebskostenminimierung unterstützt werden.

Auf Basis der Problematik wurden im zweiten Kapitel aktuell bestehende Energiemanagementverfahren erläutert und gegenübergestellt. Dabei wurde gezeigt, dass marktbasierende Verfahren ein einheitliches Vergleichsmaß, den virtuellen Warenpreis, nutzen, der sowohl als Index relativer Knappheit der Ressource Energie als auch als Schlüssel zur Verteilung der Energie auf die verschiedenen Verbraucher dient [Büc08, S. 113]. Somit kann ein Verbraucher- und Erzeugermanagement vereint werden [Büc08, S. 89–90]. Zudem ist das marktbasierende Verfahren ein kausales Verfahren, das folglich im Fahrzeug einsetzbar ist und sich nicht nur für theoretische Untersuchungen eignet. Es bietet die Möglichkeit zur dynamischen Onlineoptimierung hinsichtlich der Leistungsverteilung [Büc08, S. 113] bei niedrigem Rechenaufwand im Vergleich zu anderen online optimierenden Verfahren. Allerdings bezieht sich die Flexibilität des marktbasierenden Verfahrens bisher einzig auf ein Verbrauchermanagement, bei dem die Verbraucher unabhängig von anderen Komponenten dargestellt werden. Somit können unterschiedlichste Verbraucher in das Energiemanagementsystem durch Funktionen eingebunden werden, ohne dass dadurch die Funktionen der anderen Verbraucher verändert werden oder der Kern des Energiemanagements verändert wird. Der Kern des marktbasierenden Verfahrens besteht aus der Addition der Funktionen, dem Finden des Schnittpunkts der summierten Funktionen der Anbieter und der summierten Funktionen der Nachfrager und des Einsetzens des Handelspreises in die Funktionen der Komponenten, um die geforderte Leistung zu bestimmen. Bei den bisherigen marktbasierenden Verfahren sind allerdings die Funktionen der Erzeuger nicht unabhängig voneinander. Bspw. beschränkt sich das Erzeugermanagement bei Büchner [Büc08, S. 77] auf ein Regelwerk, das vorsieht, dass der Speicher erst dann Energie bereitstellt, wenn der Generator an seine Leistungsgrenze stößt. Die Verteilung zwischen den Erzeugern ist somit regelbasiert. Auch bei dem beschriebenen Vorgehen von Engstle [Eng09, S. 80–81] wird vorab über einen Zustandsautomat der Betriebszustand der E-Maschine und des Speichers festgelegt, so dass das Energiemanagement nur die Verteilung auf die Verbraucher festlegt. Da die Gestaltung der Funktionen der Erzeuger nicht unabhängig voneinander sind, können weitere Erzeuger oder Speicher (die auch Erzeuger sein können) nicht einfach zum Energiesystem hinzugefügt oder verändert werden. Zudem ist die Beschreibung der Schnittstellen nicht adaptierbar auf andere Komponenten, wie etwa Superkondensatoren oder Oberleitungen.

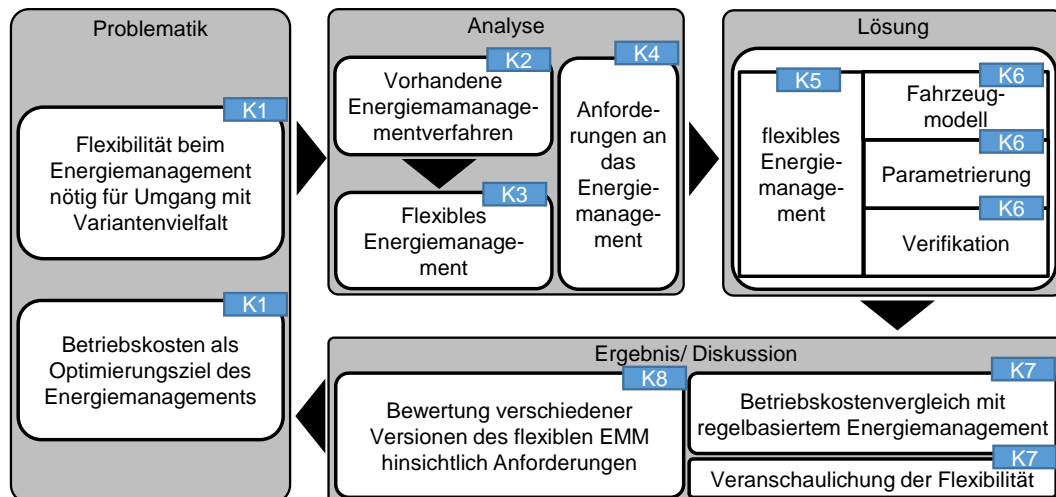


Abbildung 3.1: Vorgehen der Arbeit mit Kapitelangaben K1-K8

Hauptziel des in dieser Arbeit entwickelten und untersuchten flexiblen Energiemanagements ist eine vollständige energetische Plug-in-Fähigkeit. Diese liegt dann vor, wenn Energiekomponenten in das Energiemanagementsystem eingebunden werden können, ohne dass dieses grundlegend überarbeitet werden muss [Vie10, S. 130]. Das bedeutet, das Energiemanagementsystem muss erweiterbar und skalierbar sein. Erweiterbar bezieht sich auf die Anzahl der Energiekomponenten. Es muss sowohl bei einem Fahrzeug mit einer Quelle bzw. Senke als auch bei einem Fahrzeug mit einer Vielzahl von Quellen bzw. Senken funktionieren. Skalierbar bezieht sich auf die Ausprägungen der Energiekomponenten. Z.B. muss das Energiemanagement mit einer Batterie mit 10 kWh oder einer Batterie mit 100 kWh auf dieselbe Weise funktionieren. Das flexible Energiemanagement soll ein holistischer Ansatz sein, der ein Erzeuger-, Verbraucher und Speichermanagement vereint, sowie ganzheitlich alle Quellen und Senken im Fahrzeug betrachtet. Dabei sollen die Gesamtbetriebskosten für das bestehende System durch das flexible Energiemanagement minimiert werden. Die wissenschaftliche Fragestellung, die sich stellt, ist:

Ist ein marktbasierter Ansatz für ein flexibles Energiemanagement geeignet und wie müssen dann die Funktionen der Energiekomponenten gestaltet werden?

Das flexible Energiemanagement wird in Kapitel 5 auf Basis der in Kapitel 4 aufgestellten Anforderungen entwickelt. Die Anforderungen müssen durch die Gestaltung des Energiemanagementsystems und insbesondere durch die Gestaltung der Funktionen der Komponenten erfüllt werden. Sie setzen sich zusammen aus den Hauptanforderungen der Flexibilität und Minimierung der Betriebskosten sowie aus Anforderungen, die sich durch das Gesamtsystem und durch die einzelnen Komponenten ergeben.

Für die Entwicklung von Energiemanagementverfahren hat die Simulation des Gesamtfahrzeugs eine große Bedeutung [Hof10, S. 213–214], weil sich Fahrzeugmodelle und Simulationen sehr gut eignen, um die Energieverteilung entsprechend des Energiemanagements ohne großen monetären und zeitlichen Aufwand zu untersuchen [Laj14a, S. 28], [Ade09, S. 19], [Hal03, S. 9], [Ise06, S. 27]. Daher wird das flexible Energiemanagementverfahren anhand eines modularen Hybridfahrzeugmodells in der Simulation untersucht, das in Kapitel 6 beschrieben ist.

Damit die Betriebskosten, die aufgrund der Ansteuerung durch das flexible Energiemanagement entstehen, in Kapitel 7 und 8 vergleichbar sind, wird mit dem modularen

Hybridfahrzeugmodell ein Referenzfahrzeug durch eine entsprechende Parametrierung (Kapitel 6) abgebildet (Abbildung 3.2). Anschließend werden die Fahrzeugkomponentenmodelle des Referenzfahrzeuges durch den Vergleich der aufgezeichneten Messdaten bei einer Messfahrt mit den simulierten Ergebnissen für dieselbe Fahrt verifiziert (Kapitel 6). Das Referenzfahrzeug verwendet ein regelbasiertes Energiemanagement, wie es derzeit bei Serienfahrzeugen fast ausschließlich eingesetzt wird. Bei dem Referenzfahrzeug handelt es sich um einen seriellen Hybrid-Lkw mit einer Motor-Generator-Einheit, Ultracaps, einem Stromabnehmer und weiteren Nebenverbrauchern. Das Fahrzeugmodell fährt in der Simulation dieselbe Messfahrt. Allerdings nimmt dabei das flexible Energiemanagement die Leistungsverteilung vor. Eine Messfahrt wird insbesondere deswegen gewählt, weil es keine offiziellen standardisierten Fahrzyklen für Nutzfahrzeug, wie bei Pkw, gibt [Laj14a, S. 35]. Durch aufgezeichnete Messdaten vom Referenzfahrzeug, werden die Betriebskosten für die Messfahrt beim Realfahrzeug berechnet und mit denen des simulierten Fahrzeugs mit dem flexiblen Energiemanagement verglichen (Kapitel 7).

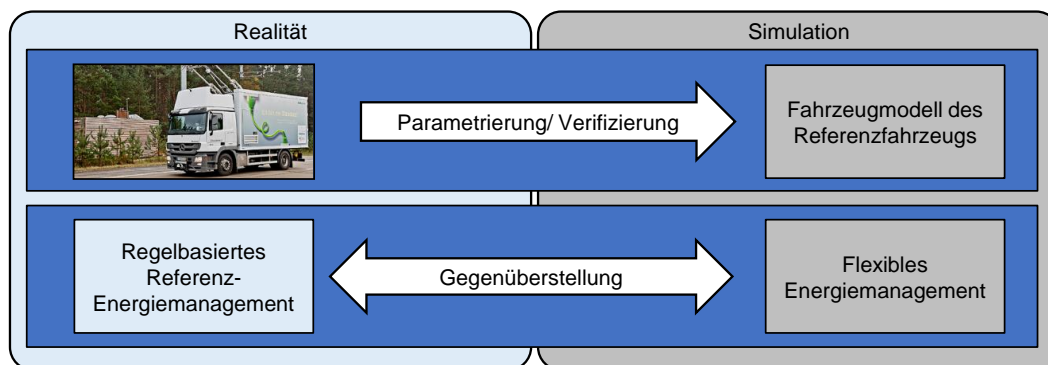


Abbildung 3.2: Vergleich des flexiblen Energiemanagements mit einem regelbasiertem Energiemanagement

Um die Flexibilität des Energiemanagements zu veranschaulichen, wird eine weitere Energiekomponente im Hybridfahrzeugmodell abgebildet. Da Lithium-Ionen Batterien in Zukunft im Fahrzeugbereich eine zunehmend wichtige Rolle aufgrund ihrer hohen Leistungs- und Energiedichte sowie ihrer hohen Zellspannung spielen werden [Hof10, S. 164–167], [Laj14a, S. 44], [Zen10, S. 1], wird diese hierfür ausgewählt. Zudem werden als elektrische Speicher fast ausschließlich Ultracaps, Batterien oder eine Kombination in Hybridfahrzeugen eingesetzt [Bur11, S. 514]. Anhand von Simulationen wird in Kapitel 7 gezeigt, wie sich die Leistungsverteilung und die Betriebskosten verändern, ohne dass der Kern des flexiblen Energiemanagements verändert wird, wenn eine Batterie an Stelle von Ultracaps integriert wird. Zudem wird der Leistungsfluss aufgezeigt, wenn das Fahrzeug von einer Oberleitung Leistung beziehen kann.

In Kapitel 8 wird die Erfüllung der in Kapitel 4 aufgestellten Anforderungen anhand der Beschreibung des flexiblen Energiemanagements und der Simulationsergebnisse, sowie dem Abgleich mit den Messungen am Realfahrzeug diskutiert. Abschließend folgen eine Zusammenfassung und ein Ausblick.

4 Anforderungen an ein flexibles Energiemanagementverfahren für Nutzfahrzeuge

Die Hauptanforderung der Flexibilität des marktbasiereten Energiemanagementverfahrens ist erfüllt, wenn das Energiemanagement mit unterschiedlicher Anzahl und Ausprägungen von Komponenten, nur anhand der Funktionen der Komponenten, die ihre Eigenschaften abbilden, die Leistungsverteilung vornehmen kann. Dazu müssen die einzelnen Funktionen komplett unabhängig voneinander sein. Nur dann können weitere Komponenten über Funktionen zum Energiehandel im Fahrzeug hinzugefügt, entfernt oder ausgetauscht werden, ohne dass sich die Funktionen anderer am Markt teilnehmender Komponenten ändern.

Zweite Hauptanforderung ist die Minimierung der gesamten durch das Energiemanagement beeinflussbaren Betriebskosten. Neben den Kraftstoffkosten und Stromkosten sollen auch Kosten durch Wartung oder Austausch von Komponenten in die Gesamtkosten miteinbezogen werden. Für jede Quelle im Fahrzeug müssen auftretende Kosten analysiert und die Leistungsverteilung gewählt werden, bei der die Summe der auftretenden Kosten durch die Quellen zur Bereitstellung der Leistung für die Senken minimiert wird. Es soll zu jedem Zeitschritt die aktuell kostengünstigste Lösung gewählt, also ein lokales Optimum gefunden werden.

Neben den Hauptanforderungen werden auf Gesamtfahrzeugebene vier weitere Anforderungen aufgestellt (Abbildung 4.1). Erstens muss bei der Berechnung der Energieverteilung das Energiemanagement jederzeit alle Quellen und Senken berücksichtigen und eine vollständige Leistungsverteilung vornehmen [Rei14, S. 225]. Das bedeutet, von den Quellen muss zu jedem Zeitpunkt ebenso viel Leistung erzeugt werden, wie von den Senken aufgenommen werden kann [Eng09, S. 75]. Zweitens gibt es entsprechend der Hybridvarianten meist mehr als einen Knotenpunkt, an dem die Leistungsverteilung in unterschiedlichen Energieformen vorgenommen werden muss (Kapitel 2.2). Bei einem seriellen Hybridfahrzeug liegen meist zwei elektrische Knotenpunkte bei verschiedenen Spannungslagen vor: einmal im Traktions-Hochvoltnetz und einmal bei den Nebenverbrauchern im Niedervoltnetz. Ein paralleles Hybridfahrzeug weist hingegen einen Knotenpunkt für die mechanische Leistungsverteilung und einen zweiten für die elektrische Leistungsverteilung auf. Folglich muss der Umgang mit mehreren Energieknotenpunkten beim Aufbau des Energiemanagements berücksichtigt werden. Drittens soll der Datenaustausch zwischen den Energiekomponenten und dem Energiemanagementsteuergerät gering gehalten werden. So kann die Anbindung möglichst vieler Quellen und Senken an das Energiemanagement ermöglicht werden, ohne dass die Datenmenge von den Datenbussen nicht mehr übertragen werden kann. Viertens sollte der Rechenaufwand und der nötige Datenspeicher möglichst gering sein, weil dies die Steuergeräte verteuert [Gru10, S. 14]. Diese Anforderung gilt nicht nur auf Gesamtfahrzeugebene, sondern ebenso auf Komponentenebene.

Zusätzlich werden auf Komponentenebene neben der Anforderungen zum minimalen Rechenaufwand vier weitere Anforderungen aufgestellt (Abbildung 4.1). Eine Anforderung ist, dass alle Betriebsgrenzen der Komponenten eingehalten werden [Jör09, S. 111], [Kop08, S. 15]. Entsprechend der Komponente handelt es sich um unterschiedliche Grenzen. Bei E-Maschinen und Verbrennungsmotoren handelt es sich bspw. um Drehzahl-, Momenten- und Leistungsgrenzen [Bia11, S. 7], [Gru10, S. 13]. Bei Batterien müssen Spannungs- bzw. Ladezustandsgrenzen eingehalten werden [Bia11, S. 7], [Riz14, S. 3].

Die Betriebsgrenzen können konstant sein, wie das Dauerdrehmoment der elektrischen Maschine, oder zeit- und prozessabhängig, wie die Überlastfähigkeit der E-Maschine [Büc08, S. 20]. Eine Verletzung der Grenzen hat zur Folge, dass das Fahrverhalten leidet, weil bspw. plötzlich die E-Maschine in den abgesicherten Modus übergeht und das Ausgangsmoment reduziert wird. Schlimmer ist es jedoch, wenn Komponenten beschädigt werden, weil diese keinen integrierten Diagnose/Sicherheitsmodus haben [Ser09a, S. 125].

Die Versorgung aller sicherheitskritischen Verbraucher muss durch das Energiemanagement sichergestellt werden [Rei14, S. 225]. Diese Verbraucher müssen weiteren Verbrauchern vorgezogen werden. Des Weiteren soll die Energie im System so gesteuert werden, dass die Fahrervorgaben erfüllt werden [Sch02, S. 461], [Pis07, S. 507], [Sal07, S. 2393], [Büc08, S. 28], [Hof10, S. 207–208], [Bia11, S. 7], [Rei12, S. 306]. Hierzu gehören die Fahrervorgaben durch Gas- und Bremspedal zur Beschleunigung und zum Bremsen des Fahrzeugs mit Hilfe des Antriebsmotors bzw. der Antriebsmotoren und der Bremsen, sowie Vorgaben zu einzelnen Nebenverbrauchern wie bspw. Licht, Radio, Fahrzeuginnenraumheizung [Hof10, S. 207–208].

Des Weiteren soll das flexible Energiemanagement in der Lage sein, dynamisch entsprechend der Fahrervorgaben, Zustands- und Umgebungsdaten eine Energieverteilung vorzunehmen, damit ein sich änderndes Systemverhalten berücksichtigt werden kann. Daher müssen die Funktionen der Komponenten dynamisch gestaltbar sein und das Energiemanagement entsprechend darauf reagieren können.

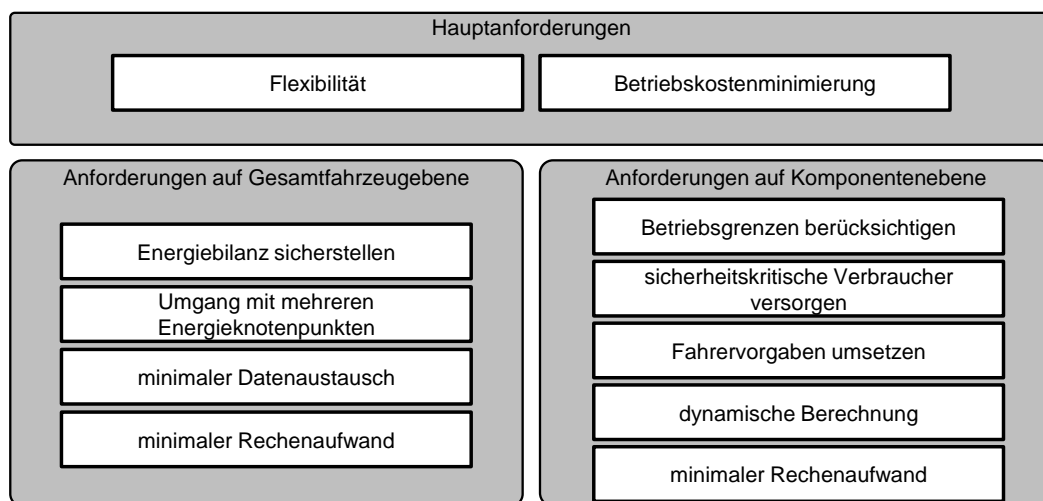


Abbildung 4.1: Anforderungen an das flexible Energiemanagement

5 Gestaltung des flexiblen Energiemanagements

Das flexible Energiemanagement wird entsprechend der aufgestellten Anforderungen (Kapitel 4) entworfen. Die Hauptanforderungen der Flexibilität und der Betriebskostenminimierung sollen sowohl durch den Aufbau des Energiemanagementsystems als auch durch die Kosten-Leistungs-Funktionen erfüllt werden. Dahingegen sollen die Anforderungen auf Gesamtfahrzeugebene ausschließlich durch den Aufbau des Energiemanagementsystems und die Anforderungen auf Komponentenebene durch die Gestaltung der Kosten-Leistungs-Funktionen der Komponenten erfüllt werden.

5.1 Aufbau des Energiemanagementsystems

Durch das Zwei-Ebenen-Prinzip und die Entscheidungslogik soll die Möglichkeit gegeben werden, flexibel neue oder veränderte Komponenten hinzuzufügen oder zu entfernen. Zudem soll mit Hilfe der Entscheidungslogik eine ausgeglichene Energiebilanz hergestellt werden, bei der die Betriebskosten mit möglichst wenig Rechenaufwand und Datenaustausch minimiert werden. Die Anforderung des Umgangs mit mehreren Energieknotenpunkten soll durch ein hierarchisches Energiemanagement erfüllt werden.

5.1.1 Zwei-Ebenen-Prinzip

Das Zwei-Ebenen-Prinzip sieht vor, dass eine Entscheidungslogik auf einer ersten Ebene berechnet, welche Leistung die einzelnen Energiekomponenten bereitstellen bzw. aufnehmen (Abbildung 5.1). Dies ist notwendig, weil ein Energiemanagement eine übergeordnete Steuerung darstellt [Ser09a, S. 77]. Angelehnt an den zentralen Energiekoordinator bei [Büc08, S. 26] berechnet die zentrale Entscheidungslogik Leistungsvorgaben für einen Zeitschritt, die den Energiekomponenten vorgegeben werden. In der zweiten Ebene werden dezentrale Regelungen bei jeder einzelnen Energiekomponente eingesetzt, die dafür sorgen, dass der geforderte Leistungswunsch zeitnah und zeitlich deutlich vor der nächsten Leistungsvorgabe selbstständig ohne Eingreifen der zentralen Steuerung umgesetzt wird.

Die Trennung der zwei Ebenen ist insbesondere deswegen wichtig, weil jede Energiekomponente eine spezifische Regelung besitzt. Um eine offene Skalierung der Informations- und Energieschnittstellen zu erreichen, sind nach [Büc08, S. 26] einheitliche Schnittstellen zu einem zentralen Energiekoordinator notwendig. Die Informationsschnittstelle zwischen den Energiekomponenten und der Entscheidungslogik muss neben der Leistungsvorgabe von der Entscheidungslogik an die Energiekomponenten auch Zustandsdaten umgekehrt von den Energiekomponenten zur Entscheidungslogik übertragen. Dabei ist die Information von der Entscheidungslogik zu den Energiekomponenten minimal, weil nur eine Leistungsvorgabe zu je einem Berechnungsschritt für jede Energiekomponente und nicht bspw. eine vorgegebene Kraftstoffeinspritzmenge beim Verbrennungsmotor und ein bestimmter Strom für einen E-Motor übertragen werden. Energiekomponentenspezifische Ansteuerungen bzw. Regelungen werden auf Basis der Leistungsvorgabe ausschließlich auf der zweiten Ebene direkt bei den Komponentensteuergeräten durchgeführt.

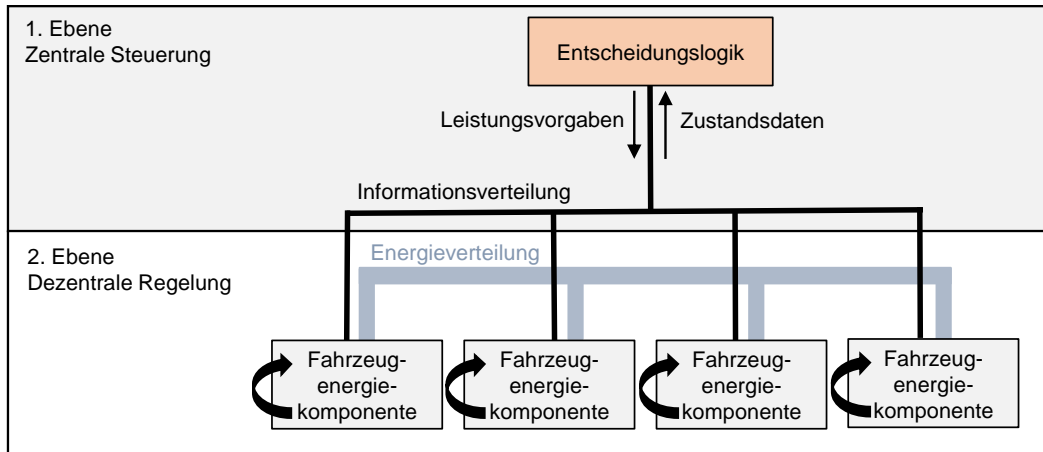


Abbildung 5.1: Zwei Ebenen-Prinzip des flexiblen Energiemanagement

Neben der Informationsschnittstelle müssen alle Energiekomponenten eines Knotenpunkts über eine Energieschnittstelle verbunden sein, um untereinander Energie auszutauschen. Im seriell hybriden Fahrzeug entspricht die Energieverteilung dem elektrischen Zwischenkreis, der physikalisch das Gleichspannungsnetz ist. Bei einem parallel hybriden Fahrzeug, wird mechanische Leistung an dem einen Knotenpunkt verteilt und elektrische Leistung an dem anderen Knotenpunkt (Kapitel 2.2). Für jeden Knotenpunkt gibt es jeweils eine Energieverteilung.

Eine Energiekomponente beim flexiblen Energiemanagement zeichnet sich dadurch aus, dass sie an mehr als eine andere Energiekomponente Leistung abgeben bzw. aufnehmen kann. Sie ist über mindestens einen Energieknotenpunkt mit anderen Energiekomponenten verbunden. Daher gibt es immer mindestens einen Freiheitsgrad bei der Ansteuerung einer Energiekomponente. Ein Verbrennungsmotor in einem seriellen Hybrid bildet bspw. nur zusammen mit dem Generator in der Verbrennungsmotor-Generator Einheit eine Energiekomponente, weil der Verbrennungsmotor nicht unabhängig vom Generator Leistung an einem Energieknotenpunkt bereitstellen kann, sondern nur an den Generator selbst.

Die Grundlage des Energiemanagements ist das Betriebszustands-Management, das Betriebszustände identifiziert [Kok06, S. 91]. Alle relevanten Zustandsdaten der Energiekomponente müssen mindestens zu jedem Berechnungsschritt des Energiemanagements gemessen oder geschätzt werden und der Entscheidungslogik bereitgestellt werden. Zur Erkennung und Übertragung der Zustandsdaten ist entsprechende Hardware und Software erforderlich. Zudem sind Komponentensteuergeräte zur Beeinflussung der Leistungsflüsse der Energiekomponenten notwendig, damit sie der Leistungsvorgabe der Entscheidungslogik folgen können [Sal07, S. 2393]. Da das Energiemanagement den Nutzwert des Fahrzeugs verbessern soll und nicht regelmäßig zu deutlichen Einschränkungen in der Nutzung von Fahrzeugfunktionen führen darf [Rei14, S. 226], ist es wichtig, dass die Hardware und Software der einzelnen Energiekomponenten zuverlässig korrekte Daten an die Entscheidungslogik übergibt und entsprechend der Leistungsvorgaben arbeitet.

5.1.2 Entscheidungslogik

Wäre das flexible Energiemanagement wie bei den in der Literatur beschriebenen markt-basierten Verfahren (Kapitel 2.3.7) aufgebaut, würde die Entscheidungslogik im ersten Schritt die Addition aller Funktionen der Energiekomponenten (Leistung über Preis pro

Leistung) beinhalten (Abbildung 5.2). Im Folgenden werden die abzugebende Leistung einer Quelle positiv und die aufzunehmende Leistung einer Senke negativ definiert. Im zweiten Schritt wird der Nullpunkt der Summenfunktion ermittelt, der den Handelspreis in Kosten pro Leistung darstellt. Im dritten Schritt wird der Handelspreis in die Funktionen der Komponenten eingesetzt, um zu ermitteln, welche Leistung die Energiekomponenten bereitstellen bzw. aufnehmen sollen. Um einen eindeutigen Handelspreis ermitteln zu können, muss die Summenfunktion aller Energiekomponenten monoton steigend und stetig sein. Damit dies garantiert ist, müssen alle einzelnen Funktionen der Energiekomponenten ebenfalls monoton steigend und stetig sein [Eng09, S. 80], [Büc08, S. 79].

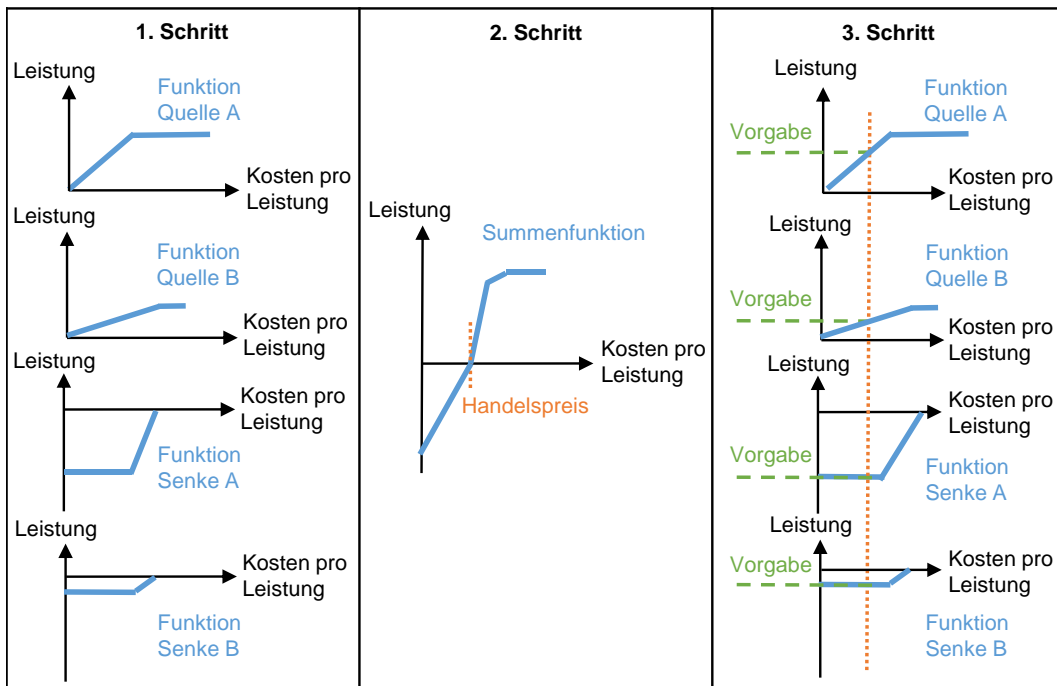


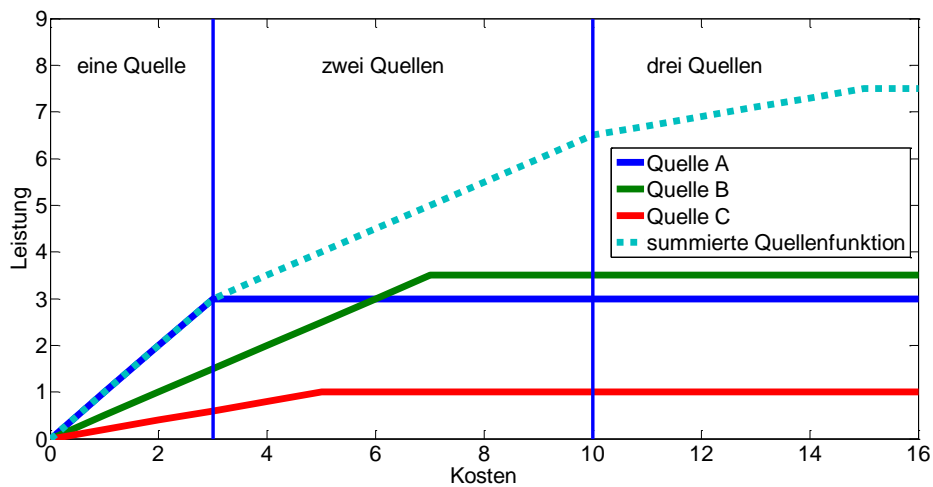
Abbildung 5.2: Entscheidungslogik des flexiblen Energiemanagements, wenn monoton steigende Funktionen (Leistung über Kosten/Leistung) für die Quellen und Senken aufgestellt werden können

Bei einigen Quellen ist allerdings die Funktion (Leistung über Kosten pro Leistung) nicht monoton steigend. Bspw. gibt das externe Netz jede Leistung, die von einem Hybridfahrzeug aufgenommen werden kann, zu gleichen Kosten pro Leistung (für denselben Preis in €/kWh) ab. Ein annähernd konstanter Preis ist auch bei weiteren Quellen pro Leistung gegeben (Kapitel 5.2).

Es können jedoch monoton steigende Kosten-Leistungs-Funktionen für alle Quellen aufgestellt werden. Um die Quellen direkt in einem Handel mit den Senken einzubeziehen, muss aus den Kosten-Leistungs-Funktionen der Quellen eine summierte Quellenfunktion in einem dem Handel vorgelagerten Schritt erstellt werden. Die summierte Quellenfunktion gibt für alle Kosten die Leistung an, die maximal durch die Summe aller Quellen zu den jeweiligen Kosten bereitgestellt werden kann. Zusätzlich gibt die Zugehörigkeitsmatrix zur summierten Quellenfunktion für den Kostenvektor an, welche Leistung jede Quelle jeweils bei den betrachteten Kosten beitragen soll.

Sind die Kosten-Leistungs-Funktionen der Quellen linear bis zur maximal bereitstellbaren Leistung, kann sehr einfach eine summierte Quellenfunktion erstellt werden, indem jeweils ab den Kosten zur maximalen Leistung der Quelle mit der größten Steigung der um diese Kosten verschobene Verlauf der Quelle mit der zweitgrößten Steigung addiert wird. Wenn von der Summe dieser beiden Quellen die Maximalleistung erreicht ist, wird der verscho-

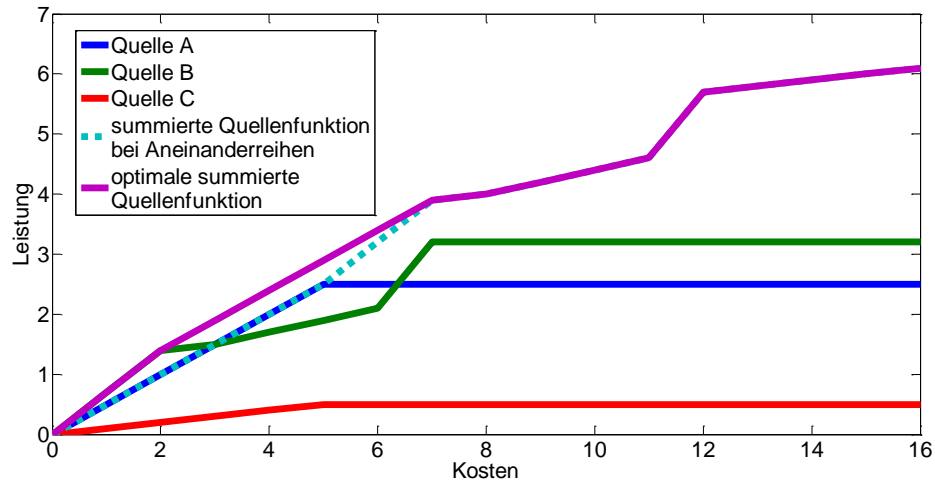
bene Verlauf der Quelle mit der drittgrößten Steigung addiert usw. (Abbildung 5.3). Dies stellt dann eine Art Rangliste dar, ab welchen Kosten jeweils eine weitere Quelle hinzugeschaltet wird.



Kostenvektor	(	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16)	
Quelle A	(	0	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3)
Quelle B		0	0	0	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5)
Quelle C		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1)
Zugehörigkeitsmatrix																				

Abbildung 5.3: Summierte Quellenfunktion mit Kostenvektor und Zugehörigkeitsmatrix zu den Quellen A, B und C im einfachsten Fall

Kreuzen sich allerdings die Kosten-Leistungs-Funktionen in dem Bereich bis zur jeweils maximal bereitstellbaren Leistung, muss die optimale Leistungsverteilung für alle Kosten berechnet werden (Abbildung 5.4). Dazu müssen alle möglichen Leistungsverteilungen für alle Kosten jeweils berechnet und das Maximum eingesetzt werden. Dabei kann es vorkommen, dass mit nur geringfügig steigenden Kosten, sich die Leistungsverteilung zwischen den Quellen vollkommen ändert, weil dann deutlich mehr Leistung für dieselben Kosten bereitgestellt werden kann.



Kostenvektor $(0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16)$

Quelle A	0	0	0	0,5	1	1,5	2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Quelle B	0	0,7	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,7	1,9	2,1	3,2	3,2	3,2	3,2
Quelle C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,4

Zugehörigkeitsmatrix

Abbildung 5.4: Summierte Quellenfunktion mit Kostenvektor und Zugehörigkeitsmatrix zu den Quellen A, B und C mit mehr Berechnungsaufwand

Die summierte Quellenfunktion wird im Handel mit den Kosten-Leistungs-Funktionen der Senken zu einer Summenfunktion addiert. Die Nullstelle der Summenfunktion stellt den Handelspreis dar, der anschließend in die Funktionen der Energiekomponenten eingesetzt wird, um die bereitzustellende bzw. aufzunehmende Leistung zu berechnen.

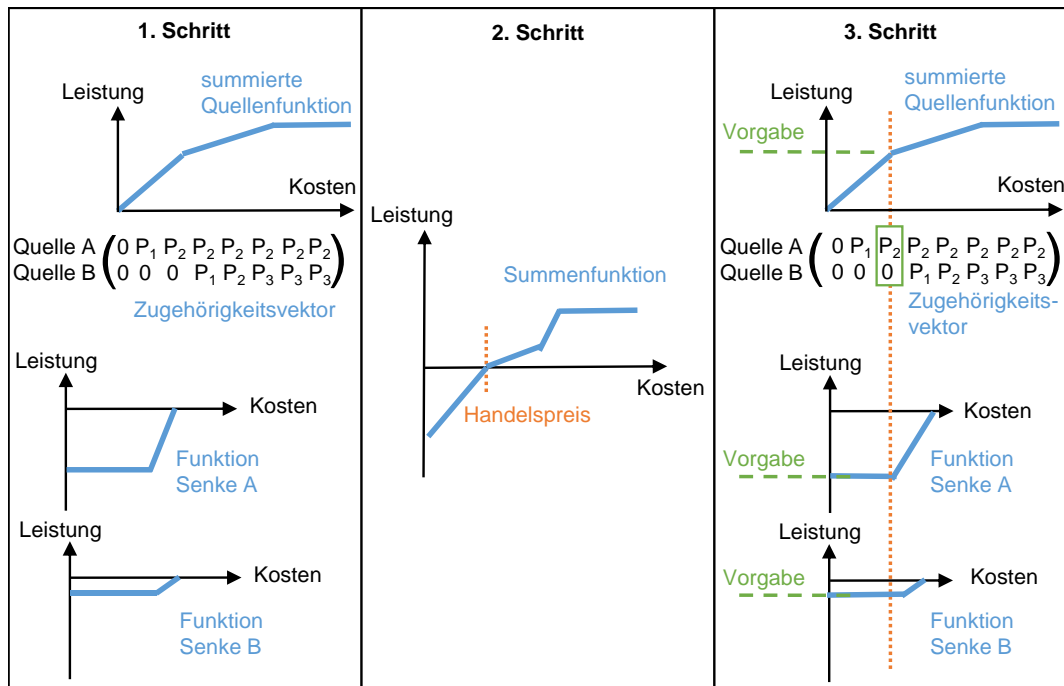


Abbildung 5.5: Entscheidungslogik des flexiblen Energiemanagements, wenn monoton steigende Kosten-Leistungs-Funktionen für die Quellen und Senken aufgestellt werden und vorab eine summierte Summenfunktion mit Zugehörigkeitsvektor aufgestellt wird

Die Anzahl der Steuerungsparameter des flexiblen Energiemanagements entspricht somit der Anzahl der berücksichtigten Kosten-Leistungs-Funktionen der Energiekomponenten. Alle Kosten-Leistungs-Funktionen und Leistungsvorgaben werden dimensionslos und mit der gleichen Auflösung übermittelt, um einen minimalen Datenaustausch zu erreichen [Bui13, S. 352].

Der Nullpunkt der Summenfunktion stellt den Punkt dar, bei dem die gleiche Leistungsmenge von den Quellen bereitgestellt, wie von den Senken aufgenommen wird. Nur dann liegt eine ausgeglichene Leistungsbilanz für den Berechnungszeitschritt und somit eine Energiebilanz vor. Um zu jedem Berechnungsschritt den Nullpunkt der Summenfunktion zu ermitteln, müssen alle Energiekomponenten in Form einer Kosten-Leistungs-Funktion berücksichtigt werden. Für eine quasistationäre Leistungsbilanz müssen die Funktionen der Energiekomponenten immer gleichzeitig zu Beginn eines Berechnungsschrittes vorliegen und der Leistungswunsch gleichzeitig allen Energiekomponenten am Ende des Berechnungsschrittes mitgeteilt werden [Eng09, S. 75]. Die Berechnung der Leistungsverteilung findet somit immer in einem konstanten Berechnungsschritt statt. Zudem müssen die Kosten-Leistungs-Funktionen immer die tatsächlich bereitzustellende bzw. aufzunehmende Leistung beinhalten. Können die Energiekomponenten nicht die angegebene Leistung bereitstellen bzw. aufnehmen, kommt es zu einer unausgeglichene Energiebilanz.

Es gibt zwei Möglichkeiten zum Datenaustausch zwischen den Energiekomponenten und der Entscheidungslogik auf einem zentralen Steuergerät [Bui13, S. 356]. Einerseits können die Energiekomponenten die jeweilige Kosten-Leistungs-Funktion selbst verwalten und bei jedem Berechnungsschritt an die Entscheidungslogik versenden. Andererseits kann für jede Komponente bei der Inbetriebnahme des Fahrzeugs die Kosten-Leistungs-Funktion in der Zentraleinheit hinterlegt und während der Fahrt von den Steuergeräten der Energiekomponenten Parameter übergeben werden, um die Funktion zu parametrieren. In Abhängigkeit von den zu übertragenden Parametern sollte die Möglichkeit mit weniger Datenaustausch gewählt werden.

Eine maximale Flexibilität des Energiemanagementsystems liegt dann vor, wenn Selbstadaptionsfähigkeit, Skalierbarkeit, Partitionierbarkeit und Modularität vorliegen und ein nachträgliches Hinzufügen von Komponenten möglich ist [Sch09, S. 50]. In Bezug auf das beschriebene Energiemanagement liegt eine Selbstadaptionsfähigkeit vor, wenn die Kosten-Leistungs-Funktionen der Energiekomponenten automatisch von der Entscheidungslogik erkannt werden, sobald eine neue Komponente hinzugefügt wird. Anschließend wird für alle erkannten Kosten-Leistungs-Funktionen das beschriebene Verfahren durchlaufen. Eine Skalierbarkeit wird dann erreicht, wenn die Entscheidungslogik bei unterschiedlichsten Fahrzeugvarianten verwendet werden kann. Dementsprechend müssen die Kosten-Leistungs-Funktionen unabhängig von der Fahrzeugtopologie aufgebaut werden. Die Partitionierbarkeit liegt vor, wenn das Energiemanagement auf verschiedenen Steuergeräten verwendet werden kann. Modularität wird durch das Zwei-Ebenen-Prinzip und die Aufteilung in Energiekomponenten erreicht. Daher können auch einfach neue Komponenten hinzugefügt werden.

5.1.3 Hierarchisches Energiemanagement

In Hybridfahrzeugen gibt es für die Traktion und im Niedervoltbordnetz mindestens zwei Energieknotenpunkte (Kapitel 2.2). Wird ein serieller Hybrid betrachtet, kann das gesamte Niedervoltbordnetz, das über einen Inverter mit dem Traktionsbordnetz verbunden ist, als eine Energiekomponente des primären Energiemanagementsystems für das Traktionsbordnetz betrachtet werden [Bui13, S. 353] (Abbildung 5.6). Innerhalb der primären Ent-

scheidungslogik findet das Energiemanagement (Kapitel 5.1.2) statt. Die sekundäre Entscheidungslogik summiert die Kosten-Leistungs-Funktionen der Komponenten im Niederspannungsbordnetz. Anschließend zieht es von der Summenfunktion des Niederspannungsbordnetzes die Leistungsverluste des Inverters ab und übermittelt an die primäre Entscheidungslogik die Funktion, oder zwei Funktionen, wenn ein Speicher vorhanden ist. Die Funktionen der Komponenten im Niederspannungsbordnetz können nicht direkt an die primäre Entscheidungslogik übertragen werden, weil die Verluste des Inverters von der Gesamtleistung der Komponenten abhängen. Entsprechend des in der primären Entscheidungslogik berechneten Handelspreises findet die Leistungszuweisung für die einzelnen Energiekomponenten im Niederspannungsbordnetz in der sekundären Entscheidungslogik statt.

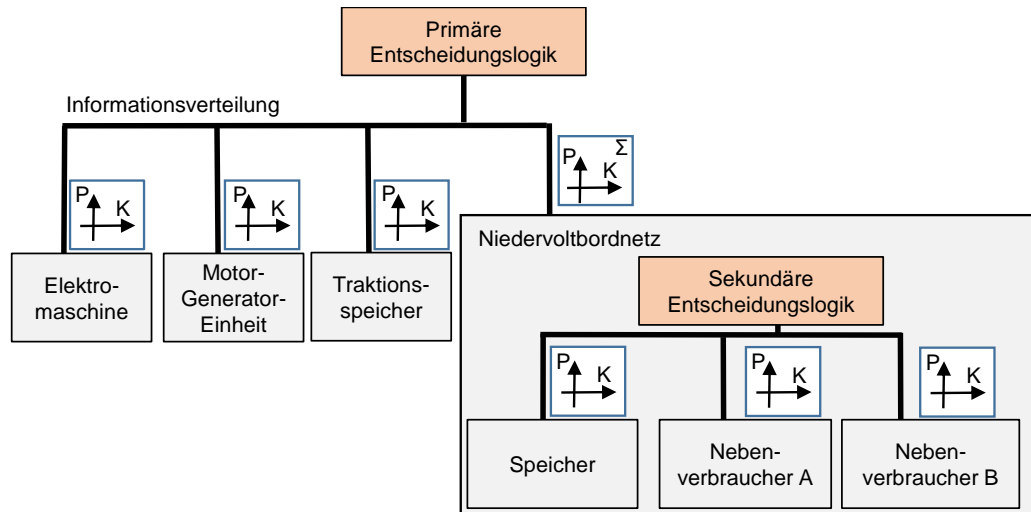


Abbildung 5.6: Hierarchischer Energiemanaementaufbau bei einem seriellen Hybrid

5.2 Kosten-Leistungs-Funktionen der Energiekomponenten

Das Referenzfahrzeug, der ENUBA Lkw, ist im Rahmen des Förderprojekts ENUBA (Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen) entstanden, um eine Vorzugslösung für den Einsatz elektrischer Energie für Energieversorgung und Antrieb schwerer Nutzfahrzeuge sowie den technischen und wirtschaftlichen Machbarkeitsnachweis dieser Lösung aufzuzeigen [Sie11, S. 2]. Als Quellen des Energiemanagements können die Energiekomponenten externes Netz, die Traktion (bei der Rekuperation), die Motor-Generator-Einheit sowie die Ultracaps (beim Entladen) dienen (Abbildung 5.7). Leistung kann im Zwischenkreis durch die Energiekomponenten Traktion, die Ultracaps (beim Laden) und die Nebenverbraucher als Senken aufgenommen werden. Es ist auch möglich, in das externe Netz einzuspeisen, sowie durch die Motorbremse beim Verbrennungsmotor in der Motor-Generator-Einheit Leistung aufzunehmen. Dies wird im Folgenden jedoch nicht berücksichtigt.

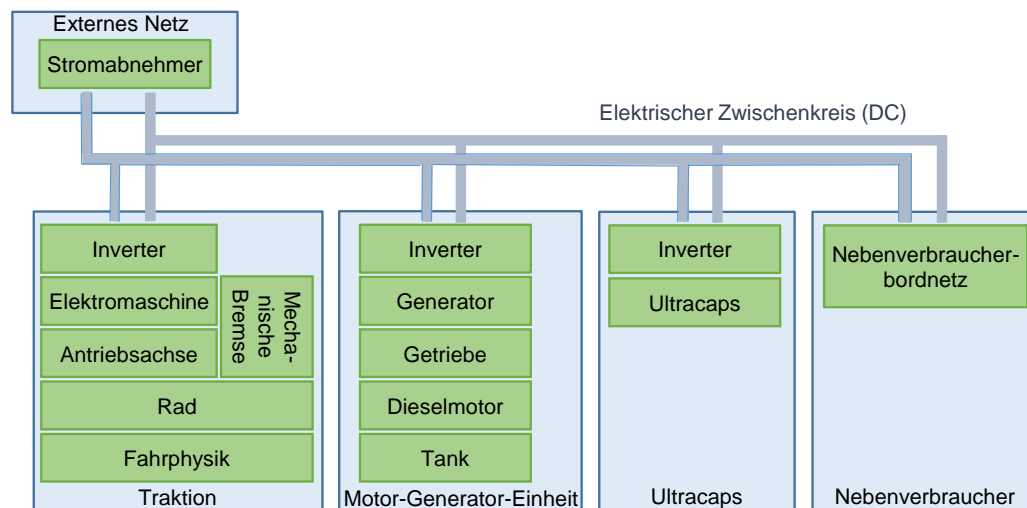


Abbildung 5.7: Energiekomponenten im ENUBA Lkw

Um die Anzahl der Komponenten in der Simulation verändern zu können und die Anforderungserfüllung der Flexibilität zu untersuchen, wird neben dem ENUBA Lkw ein zweites Versuchsfahrzeug, der Innotruck, betrachtet. Der Innotruck ist ein seriell hybrider Lkw mit einem elektrischen Traktionsmotor, einer Motor-Generator-Einheit und einer Batterie [Mer12, S. 279]. Für den Traktionsmotor und die Motor-Generatoreinheit wurden beim Innotruck dieselben Komponenten wie beim ENUBA Lkw verbaut. Allerdings besitzt der Innotruck keinen Stromabnehmer und Ultracaps, sondern eine Batterie. Daher wird zusätzlich eine Kosten-Leistungs-Funktion für eine Lithium-Ionen Batterie entwickelt und entsprechend der Batterie parametrisiert, die im Innotruck eingesetzt wird. Somit kann die Flexibilität des Energiemanagements hinsichtlich der Anzahl und Ausprägung der Komponenten an einem real existierenden Beispielfahrzeug veranschaulicht werden.

5.2.1 Grundlegende Gestaltung der Kosten-Leistungs-Funktionen

Damit neue Energiekomponenten durch Kosten-Leistungs-Funktionen dem Energiehandel hinzugefügt oder entfernt werden können, ohne dass dies grundlegende Auswirkungen auf das bestehende Energiemanagement hat, müssen die Kosten-Leistungs-Funktionen der Energiekomponente unabhängig von anderen Energiekomponenten sein. Zur Erstellung der Kosten-Leistungs-Funktionen darf keine Information über andere Energiekomponenten verwendet werden. Bspw. darf die Funktion der Motor-Generator-Einheit nicht abhängig vom Ladezustand der Batterie sein.

Die Summenfunktion aller Energiekomponenten muss monoton steigend und stetig sein, um einen eindeutigen Handelspreis ermitteln zu können (Kapitel 5.1.2). Um dies zu garantieren, müssen alle einzelnen Kosten-Leistungs-Funktionen der Energiekomponenten ebenfalls monoton steigend und stetig sein.

Des Weiteren müssen die Kosten-Leistungs-Funktionen der Senken in den Kosten beschränkt sein, wohingegen die Kosten-Leistungs-Funktionen der Quellen nicht beschränkt sein dürfen [Büc08, S. 79]. Nur dann kann eine Nullstelle der Summenfunktionen bei allen Quellenfunktionen garantiert werden (Abbildung 5.8 links). Zudem muss die Kosten-Leistungs-Funktion der Quellen, und somit die Quelle selber, komplett abschaltbar sein, also auch in der Lage sein, keine Leistung bereitzustellen (Abbildung 5.8 rechts). Das Verfahren würde auch funktionieren, wenn die Quelle eine minimale Leistung bereitstellt, wenn die Kombination an Senken diese immer aufnehmen kann. Allerdings müssten dann

für die Gestaltung der Kosten-Leistungs-Funktion der Quellen, die minimal aufzunehmende Leistung durch die Senken und die minimal abzugebende Leistung der anderen Quellen berücksichtigt werden. Die Anforderung der Flexibilität würde dann nicht mehr uneingeschränkt erfüllt werden, weil die Kosten-Leistungs-Funktion einer Komponente abhängig von Informationen anderen Komponenten ist.

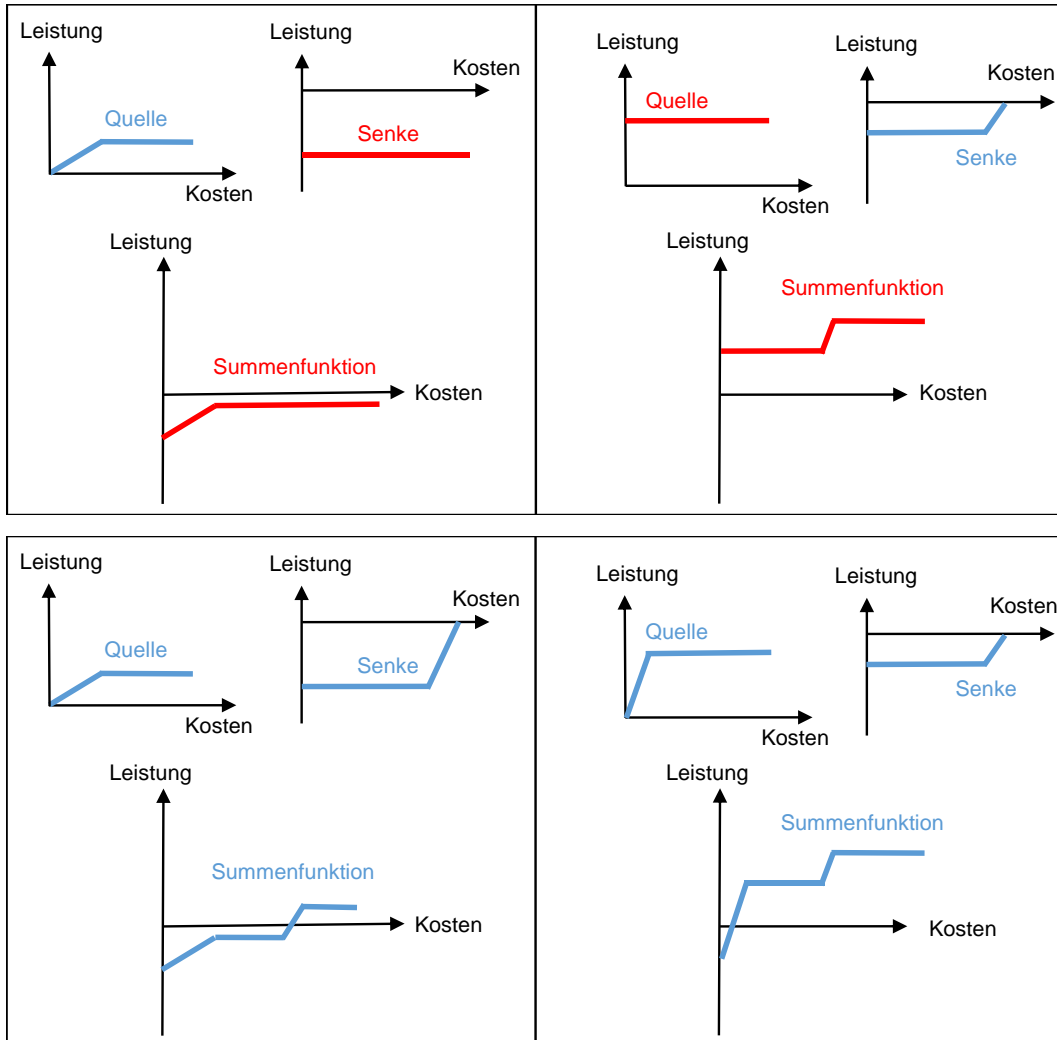


Abbildung 5.8: Summenfunktionen ohne Begrenzung (oben) und mit Begrenzung (unten) der Kosten-Leistungs-Funktion der Senke (links) und der Quelle (rechts)

Die Gestaltung der Kosten-Leistungs-Funktionen muss außerdem die Betriebsgrenzen der Energiekomponenten abbilden. Nur so kann bei der Entscheidungslogik sichergestellt werden, dass keine Leistungen gefordert werden, die nicht von den Energiekomponenten umsetzbar sind. Die Kosten-Leistungs-Funktion einer Quelle gibt auch bei höheren Preisen nicht mehr als die aktuell maximale elektrische Leistung an, die geliefert werden kann (Abbildung 5.9 links). Die maximale Leistung, die von einer Senke aufgenommen werden kann, wird je nach Priorität nur bis zu einem Grenzpreis gefordert [Bui13, S. 355] (Abbildung 5.9 rechts). Die Maximalleistung kann im Fehlerfall bis auf den Wert Null herabgesenkt werden, so dass die Energiekomponente bei jedem Handelspreis eine Leistungsanforderung gleich Null bekommt.

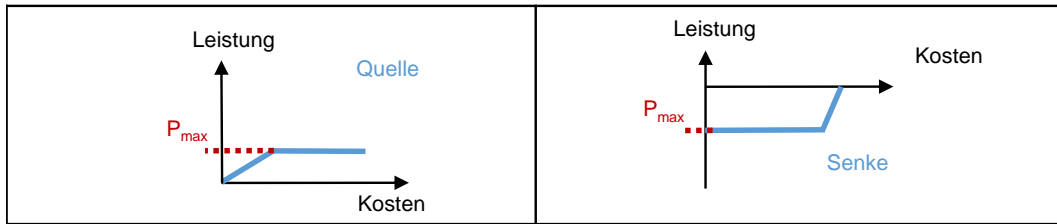


Abbildung 5.9: Begrenzung der Kosten-Leistungs-Funktionen durch Betriebsgrenzen bei Quellen (links) und Senken (rechts)

5.2.2 Energiekomponenten als Quellen

Damit eine betriebskostenoptimale Leistungsverteilung berechnet werden kann, bilden die Kosten-Leistungs-Funktionen der Quellen die auftretenden Betriebskosten für die abzugebende Leistung ab [Bui13, S. 351]. Dadurch wird mit der beschriebenen Entscheidungslogik nur die Kombination aus Quellen zur Leistungsbereitstellung ausgewählt, die in Summe die geringsten Betriebskosten verursachen, um die priorisierten Senken zu versorgen [Bui13, S. 355]. Neben der Entscheidungslogik, muss allerdings jede einzelne Energiekomponente auch zu minimalen Betriebskosten beitragen, indem eventuell vorliegende Freiheitsgrade in der Energiekomponente so angesteuert werden, dass für jede abzugebende Leistung minimale Betriebskosten entstehen [Bui13, S. 354–355].

Bei der Aufstellung der Kosten-Leistungs-Funktionen, insbesondere bei der Berechnung der für den Fahrzeugbetreiber entstehenden und durch das Energiemanagement beeinflussbaren Betriebskosten muss der Mehrwert einer genaueren Berechnung dem Rechenaufwand gegenübergestellt werden. Eine minimal detailliertere Berechnung einzelner Betriebskosten kann keine sehr aufwändigen Rechnungen in jedem Berechnungsschritt rechtfertigen. Da das Energiemanagement Berechnungszeitschritte von einer Sekunde verwendet, beziehen sich die für die Kosten-Leistungs-Funktionen der Quellen berechneten Betriebskosten immer auf eine Leistungsbereitstellung für eine Sekunde.

5.2.2.1 Motor-Generator-Einheit

Um die Kosten-Leistungs-Funktion der Motor-Generator-Einheit aufzustellen, werden die entstehenden Betriebskosten für verschiedene Leistungsanforderungen berechnet. Werden als Betriebskosten der Motor-Generator-Einheit $K_{MGE}(P)$ nur die Kraftstoffkosten berücksichtigt, werden diese über den von der bereitgestellten Leistung abhängigen Kraftstoffverbrauch $\dot{m}_{Diesel}(P)$ und den Dieselpreis K_{Diesel} im Berechnungsschritt Δt in Abhängigkeit der Leistungsvorgabe berechnet (Gl. 5.1).

$$K_{MGE}(P) = \dot{m}_{Diesel}(P)\Delta t_{Berechnung}K_{Diesel} \quad (\text{Gl. 5.1})$$

Die Motor-Generator-Einheit hat im seriellen Hybrid für jede Leistung, die bereitgestellt werden kann die zwei Freiheitsgrade, Drehzahl und Drehmoment. Diese werden so von der Regelung der Energiekomponente vorgegeben, dass möglichst geringe Betriebskosten bei den jeweiligen bereitzustellenden Leistungen entstehen. Die im ENUBA Lkw ausgelegte Komponentenregelung gibt daher eine Momentenvorgabe für den Generator und eine Drehzahlvorgabe für den Verbrennungsmotor bei jeder Leistungsvorgabe vor, bei welcher der geringste Kraftstoffverbrauch auftritt. Das Moment des Verbrennungsmotors und die Drehzahl des Generators ergeben sich durch die Übersetzung und den Wirkungsgrad des Hochsetzgetriebes, das beide Komponenten miteinander verbindet. Der Kraftstoffmassenstrom wird über statische Wirkungsgradkennfelder, die von der Drehzahl

und dem Drehmoment abhängen, berechnet. Der genaue Zusammenhang ist in Kapitel 6.2.1 und 6.3.1 beschrieben. Die Kosten-Leistungsfunktion kann variabel mit dem aktuellen Dieselpreis rechnen. Für die folgenden Berechnungen wird ein fester Dieselpreis mit 1,41 € im Jahr 2013 angenommen [Koc14, S. 13].

Der Kraftstoffverbrauch ist von der Temperatur abhängig [Sch14b, S. 321]. Daher müsste zu Beginn einer Fahrt, wenn der Dieselmotor noch kalt ist, ein anderes Wirkungsgradkennfeld verwendet und die Kosten-Leistungs-Funktion angepasst werden. Ist der Motor jedoch einmal warm, ist die thermische Trägheit eines Dieselmotors so hoch, so dass die Motortemperatur nicht im Energiemanagement berücksichtigt werden muss [Göh97, S. 61]. Folglich wird der Effekt nicht in die Kosten-Leistungs-Funktion mit einbezogen.

Neben dem Kraftstoffverbrauch können Wartungskosten als weitere Betriebskosten berücksichtigt werden. Wartungskosten für einen Dieselmotor entstehen bspw. durch den Wechsel des Luft-, Kraftstoff- und Motorölfilters, sowie den Motorölwechsel. Bei dem im Referenzfahrzeug eingesetzten Verbrennungsmotor handelt es sich um einen Dieselmotor, der auch in einem Fernverkehrs Lkw von Mercedes eingesetzt wird. Bei einer jährlichen Laufzeit von 130.000 km können Wartung- und Reparaturkosten von 4-5 cent/km für den Motorwagen angenommen werden [Wit12, S. 86]. Auch bei [Hoe13, S. 380] werden die Wartungsintervalle für den Dieselmotor eines schweren Lkw, mit mehr als 100.000 km angenommen. Nach [Gra13] betragen die Reparatur- und Wartungskosten sogar nur 3,82 cent/km, allerdings für einen Lkw im Verteilerverkehr mit einem etwas kleineren Motor. Ein großer Anteil der Wartungskosten bezieht sich auf den Dieselmotor. Wird angenommen, dass die Wartung des betrachteten Dieselmotors 2 cent/km bei 130.000 km/Jahr beträgt, so entstehen $8,2 \cdot 10^{-5}$ € Wartungskosten pro Sekunde. Wenn vereinfacht angenommen wird, dass der Betrieb des Dieselmotors, unabhängig von der bereitgestellten Leistung gleichermaßen diese Betriebskosten verursacht, können die Wartungskosten $K_{Wartung}$ einfach zu den Kraftstoffkosten addiert werden (Gl. 5.2).

$$K_{MGE}(P_{MGE}) = \dot{m}_{Diesel}(P_{MGE})\Delta t_{Berechnung}K_{Diesel} + K_{Wartung} \quad (\text{Gl. 5.2})$$

Die Kosten-Leistungsfunktion wird durch die Wartungskosten des Dieselmotors kaum verändert (Abbildung 5.10). Sie ist fast linear mit der Leistung. Lediglich bei sehr kleinen Leistungen sind die Kosten vergleichsweise etwas höher. Ab der maximalen Leistung der Motor-Generator-Einheit von 203 kW ist diese entsprechend der grundlegenden Gestaltung einer Quelle waagrecht, um die Einhaltung der Betriebsgrenze sicherzustellen.

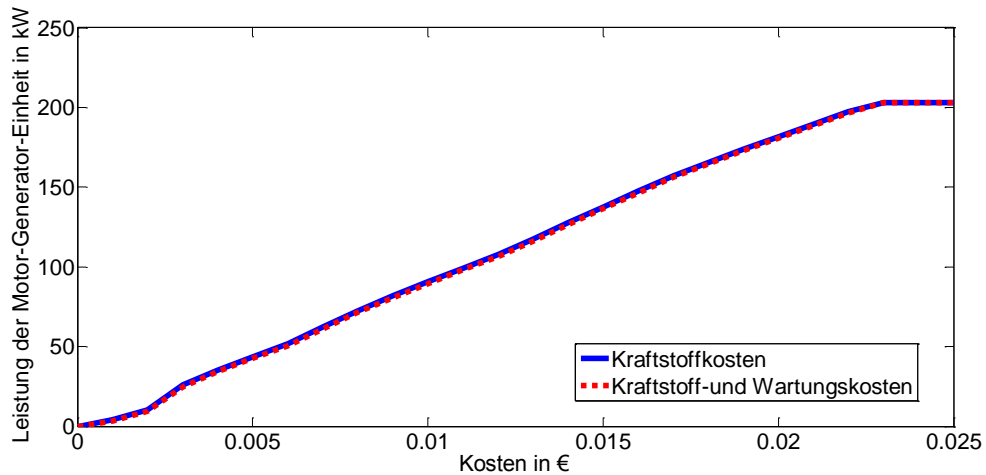


Abbildung 5.10: Kosten-Leistungs-Funktion der Motor-Generator-Einheit als Quelle unter Berücksichtigung der Kraftstoff- und Wartungskosten

Problematisch bei der Aufstellung der Kosten-Leistungs-Funktion der Motor-Generator-Einheit ist, dass die Leerlaufkosten für die Leistung gleich Null nicht angegeben werden können. Würde die Funktion bei der Leistung gleich Null bereits einen Kostenwert aufweisen und davor nicht, könnte nicht für jeden Handelspreis eine Leistungsvorgabe ermittelt werden. Ist der Leistungswert bis zu den Leerlaufkosten gleich Null, würde das bedeuten, dass die Leistung Null auch zu kleineren Kosten bereitgestellt wird.

Mögliche Kosten durch die Abgasemissionen können hingegen in die Kosten-Leistungs-Funktion der Motor-Generator-Einheit mit einfließen. Liegt entsprechend der Umgebungsdaten eine Zero Emission Zone vor, ist die Kosten-Leistungs-Funktion für alle Kosten gleich Null. Alternativ kann auch die Kosten-Leistungs-Funktion der Motor-Generator-Einheit dann nicht im Handel berücksichtigt werden. Befindet sich das Fahrzeug in einem Bereich mit einer CO₂-abhängigen Abgabe, kann diese zudem zu den Kosten addiert werden.

5.2.2.2 Externes Netz

Ist eine Oberleitung bei der Strecke vorhanden, kann über diese mit Hilfe des Stromabnehmers des Referenz-Fahrzeugs Leistung im Energieknotenpunkt bereitgestellt werden. Die Betriebskosten, die durch die Bereitstellung von Leistung durch das externe Netz entstehen $K_{EN}(P_{EN})$, werden über den elektrischen Energiepreis K_{Strom} , die Berechnungsschrittzeit $\Delta t_{Berechnung}$ und die bereitgestellte Leistung P_{EN} berechnet (Gl. 5.3).

$$K_{EN}(P_{EN}) = \Delta t_{Berechnung} K_{Strom} P_{EN} \quad (\text{Gl. 5.3})$$

Für den elektrischen Energiepreis wird der durchschnittliche Strompreis für den Haushalt von 0,26 €/kWh angenommen [Koc14, S. 13]. Bei der Kosten-Leistungs-Funktion des externen Netzes als Quelle wird davon ausgegangen, dass nur eine bestimmte elektrische Leistung, und zwar 300 kW über die Oberleitungen geliefert werden kann (Abbildung 5.11). Dies entspricht der aus der Oberleitung auf der Teststrecke in Groß-Dölln maximal entnommenen Leistung. Mit dieser Leistung kann der maximale Gesamtenergiebedarf des ENUBA Lkw gedeckt werden.

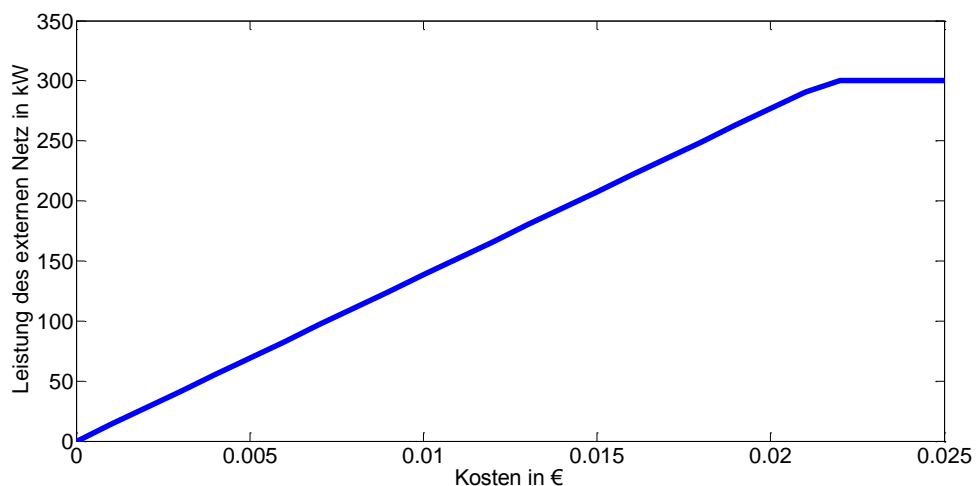


Abbildung 5.11: Kosten-Leistungs-Funktion des externen Netzes als Quelle

5.2.2.3 Traktion

Entsprechend des Fahrerwunsches, der unter anderem durch die Bremspedalstellung geäußert wird, müssen die Bremsen im Fahrzeug angesteuert werden. Das Fahrzeug kann über den Traktionsmotor generatorisch oder mit Hilfe der Druckluftbremse konventionell gebremst werden. Aus Sicherheitsgründen muss die erforderliche maximale Bremsleistung deutlich höher sein als die übliche Antriebsleistung, weswegen das generatorische Bremsen über den Traktionsmotor in bestimmten Fahrsituationen alleine nicht ausreicht [Wal10, S. 143]. Um die Verteilung zwischen den beiden Bremsmöglichkeiten vorzugeben, ist ein Bremsenblending nötig, das im ENUBA Lkw in der Fahrsteuerung implementiert ist. Das Bremsenblending muss festlegen, ob bis zu einer bestimmten prozentualen Betätigung des Bremspedals nur regenerativ und dann zusätzlich mechanisch oder immer parallel mit beiden Bremsmöglichkeiten gebremst wird [Ser09a, S. 124–125], [Moh b, S. 1484–1485]. Zudem ist es auch möglich, bereits dann zu rekuperieren, wenn weder das Bremspedal noch das Gaspedal betätigt wird. Dadurch kann die Schlepplleistung durch die Motorbremse, die Fahrer von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren gewohnt sind, nachempfunden werden. Sowohl der Übergang vom Bremsen durch Rekuperation zum Bremsen durch die Kombination aus beiden Bremsmöglichkeiten, als auch die Bremsverteilung über die gesamte Bremspedalstellung, muss so gestaltet werden, dass der Fahrer dies nicht als störend wahrnimmt [Wal10, S. 143], [Ser09a, S. 124–125]. Zudem muss durch das Bremsenblending sichergestellt werden, dass das Fahrzeug nicht instabil wird [Wal10, S. 143]. So müssen Eingriffe von Regelsystemen wie bspw. ASR, ABS und ESP berücksichtigt werden [Ser09a, S. 124–125]. Des Weiteren muss bei der Auslegung der Bremskraftverteilung berücksichtigt werden, dass die Bremsleistung der Elektromaschine von der Geschwindigkeit abhängig ist [Wal10, S. 143].

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass das im Fahrzeug implementierte Bremsenblending bereits hinsichtlich der möglichen bereitzustellenden Rekuperationsleistung, unter Berücksichtigung der beschriebenen Anforderungen an das Fahrverhalten, maximal ist. Für eine detaillierte Beschreibung der Fahrsteuerung wird auf [Mei14, S. 4] verwiesen. Diese wurde in der Fahrzeugsimulation implementiert und anhand von Messungen am Realfahrzeug und dem anschließenden Vergleich mit Simulationsergebnissen verifiziert [Mei14, S. 9].

Für die Bereitstellung von der Bremsenergie an den Rädern bis zu der rekuperierten elektrischen Leistung der Elektromaschine entstehen keine Betriebskosten. Auch Wartungskosten der Elektromaschine können vernachlässigt werden, weil es nur wenige bewegliche Teile gibt und die Lebensdauer der Motor als sehr hoch angesehen werden kann [van10, S. 6575]. Ziel sollte es daher sein, möglichst viel rekuperierte Leistung aufzunehmen.

Eine Kosten-Leistungs-Funktion, die vergleichbar zu den anderen Energiekomponenten als Quelle ist, kann unter Berücksichtigung der grundlegenden Gestaltungsrichtlinien der Funktionen nicht aufgestellt werden, weil keine Kosten entstehen. Stattdessen wird der Leistungsbedarf, der durch die Summenfunktion der Kosten-Leistungs-Funktionen der Senken ausgedrückt wird, zuerst um die durch die Traktion bereitgestellte Leistung verringert, bevor der eigentliche Handel stattfindet. Ist das Leistungsmaximum der Senken-Summenfunktion kleiner als die rekuperierbare Leistung, muss die Leistungsabgabe der Traktion entsprechend begrenzt werden. In dem Fall muss die übrige Bremsleistung zusätzlich durch die mechanische Bremse erzeugt werden.

5.2.2.4 Lithium-Ionen Batterien

Betriebskosten der Lithium-Ionen Batterie entstehen bereits vor der Bereitstellung der Leistung für den Berechnungsschritt, beim Laden der Batterie. Zudem hat das Energiemanagement eine starke Auswirkung auf die Alterung der Batterie [Lin11, S. 57], [Sal07, S. 2402], [Fad11, S. 3273], [Di10, S. 6], [Mar09, S. 2], [Bas11, S. 547]. Da die Batterie üblicherweise aufgrund der Alterung während der Fahrzeuglebensdauer ausgetauscht werden muss, entstehen Betriebskosten, die vom Energiemanagement beeinflussbar sind [Lin11, S. 57], [Ste12, S. 175], [Coi12, S. 60], [Laj12a, S. 2–3]. Die Kosten für die Bereitstellung der Leistung einer Batterie in einem Berechnungsschritt $K_{Batt}(P_{Batt})$ ergeben sich somit aus der Summe der Einkaufskosten $K_{Einkauf,Batt}$, der bereitgestellten Leistung P_{Batt} und den Kosten für den alterungsbedingten Austausch der Batterie $K_{Austausch,Batt}(P_{Batt})$ (Gl. 5.4).

$$K_{Batt}(P_{Batt}) = K_{Einkauf,Batt}P_{Batt} + K_{Austausch,Batt}(P_{Batt}) \quad (\text{Gl. 5.4})$$

Entsprechend der Kosten $K_{Batt,laden}$ für die erworbene Ladeleistung $P_{Batt,laden}$ berechnen sich die Einkaufskosten über das Produkt aus dem Durchschnittspreis für die aufgenommene Ladeleistung und die bereitzustellenden Entladeleistung der Batterie P_{Batt} (Gl. 5.5). Die Ladekosten beinhalten nur die Ladeleistung, die nicht per Rekuperation und somit kostenlos aufgenommen wurde.

$$K_{Einkauf,Batt} = \frac{\int K_{Batt,laden}(P_{Batt,laden}) dt}{\int P_{Batt,laden} dt} P_{Batt} \quad (\text{Gl. 5.5})$$

Die Kosten für den alterungsbedingten Austausch werden über die Austauschkosten für die Batterie $K_{Austausch,Batt}$ und den von der Leistungsbereitstellung abhängigen Anteil der Alterung bis zum Lebensdauerende $\Delta Alterung_{Batt}(P_{Batt})$ berechnet (Gl. 5.6).

$$K_{Austausch,Batt}(P_{Batt}) = \Delta Alterung_{Batt}(P_{Batt}) K_{Austausch,Batt} \quad (\text{Gl. 5.6})$$

Als Austauschkosten werden vereinfacht die Beschaffungskosten der Batterie angenommen. Der Restwert oder die Restkosten der Batterie sind nach dem Einsatz im Fahrzeug schwer abschätzbar [Laj14a, S. 44]. Wird die Batterie in eine Second Life Anwendung gebracht, kann der Fahrzeugbetreiber einen Erlös durch die alte Batterie erwirtschaften. Muss die Batterie jedoch in ein aufwändiges Recyceln gegeben werden, entstehen weite-

re Kosten für den Betreiber. Da die Kosten erst in der Zukunft entstehen werden, und davon ausgegangen werden kann, dass die Beschaffungskosten einer Batterie in Zukunft stark sinken [Koc14, S. 5], werden Batteriekosten für das Jahr 2020 von 252 €/kWh+300 € für das Gesamtsystem Batterie angenommen [Koc14, S. 6]. Bei einer elektrischen Energie der Batterie von 106 kWh ergeben sich somit Kosten von 27012 €.

Die Alterung der Batterie wirkt sich durch einen Kapazitätsverlust und einen Anstieg des Innenwiderstands aus [Bou11b, S. 1], [Eng09, S. 249], [Lar14, S. 19]. Meist wird ein Lebensdauerende bei 80% der Anfangskapazität festgelegt [Jos06, S. 143], [Dub09, S. 542], [Lar14, S. 18]. Dann ist der Alterungsanteil bis zum Lebensdauerende gleich dem Kapazitätsverlust durch die Leistungsbereitstellung $\Delta C_{Batt}(P_{Batt})$ bezogen auf 20% der Anfangskapazität $C_{Batt,0}$ der Batterie (Gl. 5.7).

$$\Delta \text{Alterung}_{Batt}(P_{Batt}) = \frac{\Delta C_{Batt}(P_{Batt})}{0,2 C_{Batt,0}} \quad (\text{Gl. 5.7})$$

Bei Lithium-Ionen Batterien wird zwischen kalendarischer und zyklischer Alterung unterschieden [Jos06, S. 141], [Hof10, S. 150]. Eine kalendarische Alterung liegt dann vor, wenn die Batterie weder geladen noch entladen wird [Hof10, S. 150]. Wie diverse Versuchsreihen zeigen [Bro05, S. 96], [Käb13, S. 582], [Mar14, S. 5], [Sch14a, S. 328], [Eck14, S. 842–844] sind die Haupteinflussgrößen auf die kalendarische Alterung die Lagertemperatur und der Ladezustand, wobei insbesondere hohe Ladezustände und Temperaturen die Alterung beschleunigen [Jos06, S. 144]. Auf weitere Untersuchungen ist in [Mei15, S. 3] verwiesen. Wird die Batterie geladen bzw. entladen, tritt zyklische Alterung auf, die hauptsächlich von dem Strom und dem damit verbundenen Ladungsdurchsatz, der Zyklentiefe ΔDOD und dem Ladezustand, um den die Zyklisierung stattfindet, abhängt [Mar14, S. 5], [Rei10a, S. 57–58], [Eck14, S. 845–848], [Sch14a, S. 329–331], [Käb13, S. 576], [Her10, S. 42]. Die Alterung und die damit verbundene Kapazitätsabnahme und der Innenwiderstandsanstieg nehmen mit steigendem Ladungsdurchsatz, höheren Zyklentiefen und Abweichungen von einem mittleren Ladezustand zu [Eck14, S. 846].

Die kalendarische Alterung einer Batterie kann vor allem dahingehend durch das Energiemanagement verringert werden, dass die Klimatisierung der Batterie immer genügend elektrische Leistung zur Funktionserfüllung bekommt. Der Nutzen der benötigten Leistung zur Klimatisierung der Batterie und die dadurch auftretenden Kosten können den Kosten durch schnellere Alterung gegenübergestellt werden. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass es wirtschaftlicher ist, die Batteriekühlung immer funktionstüchtig zu halten. Zudem kann das Energiemanagement beim Abstellen des Fahrzeuges einen mittleren Ladezustand sicherstellen, soweit es sich um ein vorausschauendes Energiemanagement handelt und ein Optimum gefunden wird zwischen Einsparungen durch den Nutzen der Batterie während der Fahrt und Verluste durch Alterung nach der Fahrt. Dies ist bei dem beschriebenen Energiemanagement nicht möglich, weil es sich um ein lokal optimierendes Energiemanagement handelt. Der größte Anteil der kalendarische Alterung tritt allerdings beim Stillstand des Fahrzeugs in einer warmen Umgebung auf [Bou11a, S. 1]. Dann ist das Energiemanagement allerdings üblicherweise nicht mehr aktiv.

Vor allem aber die zyklische Alterung kann durch das Energiemanagement stark beeinflusst werden [Kok06, S. 101], [Bou11a, S. 1], [Ebb12, S. 59]. Das Energiemanagement legt durch die Leistungsverteilung direkt den Ladungsdurchsatz, die Zyklentiefe und den resultierenden Ladungszustand und somit die Haupteinflussgrößen für die zyklische Alterung der Batterie fest. Um die Kapazitätsabnahme zu berechnen, die durch zyklische Alterung aufgrund verschiedenen bereitstellender Leistungen entsteht, ist ein Alterungsmo-

dell nötig. Wie anhand des Verfahrens in [Mei15, S. 10] gezeigt, eignen sich hierfür Performancemodelle. Sie geben über Gleichungen, die durch Messungen parametrisiert werden, den Zusammenhang zwischen Batterieparameteränderungen, wie der Kapazitätsabnahme und den Einflussgrößen auf die Alterung, wie beispielweise Ladungsdurchsatz, direkt an. Dies erlaubt eine schnelle Berechnung im Fahrzeug, die vergleichsweise genau ist und Vorhersagen hinsichtlich der auftretenden Alterung bei verschiedenen Einflussgrößen erlaubt. Nachteilig ist, dass ein Performancemodell anhand von Messungen parametrisiert werden muss. Je differenzierter das verwendete Alterungsmodell ist und umso mehr Einflussgrößen betrachtet werden, umso länger dauert die Parametrisierung des Modells. In der Literatur ist eine Vielzahl unterschiedlichster Modelle beschrieben:

Ein einfaches Alterungsmodell [Ebb12, S. 61] geht davon aus, dass eine Batterie eine bestimmte Anzahl an Vollzyklen $N_{Zyklen,batt}$ umsetzen kann, bis das Lebensdauerende also ein Kapazitätsverlust von 20% erreicht ist (Gl. 5.8). Die Anzahl der Lebenszyklen der betrachteten Batterie bei Vollzyklen mit einer Zyklentiefe von 100% wird mit 3600 Zyklen angegeben [Sch12, S. 25]. Ein Vollzyklus entspricht dem Ladungsumsatz von zweimal der Nennkapazität [Her10, S. 53]. Der Anteil der Alterung einer Batterie kann somit auf den Anteil an einem Vollzyklus $\%Zyklus_{Batt}$ bezogen auf die Anzahl der gesamten Lebensdauerzyklen berechnet werden.

$$\Delta Alterung_{Batt}(P_{Batt}) = \frac{\%Zyklus_{Batt}(P_{Batt})}{N_{Zyklen,batt}} \quad (Gl. 5.8)$$

Der Anteil an einem Zyklus entsprechend der bereitgestellten Leistung wird über den Energiedurchsatz $W_{Batt}(P_{Batt})$ bezogen auf den doppelten anfänglichen Energieinhalt der Batterie berechnet (Gl. 5.9). Der Faktor zwei liegt darin begründet, dass ein Vollzyklus einem Energieumsatz von zweimal der Energie der Batterie gleicht und somit dem vollständigen Entladen und Laden. Der anfängliche Energieinhalt $E_{Batt,0}$ beträgt bei der betrachteten Batterie 106 kWh [Aka13].

$$\%Zyklus_{Batt}(P_{Batt}) = \frac{W_{Batt}(P_{Batt})}{2E_{Batt,0}} \quad (Gl. 5.9)$$

Der Energiedurchsatz wird über die bereitgestellte Leistung P_{Batt} und den Berechnungsschritt $\Delta t_{Berechnung}$ berechnet (Gl. 5.10).

$$W_{Batt}(P_{Batt}) = P_{Batt} \Delta t_{Berechnung} \quad (Gl. 5.10)$$

Um das Alterungsmodell zu verbessern, kann berücksichtigt werden, dass die Anzahl der Lebenszyklen stark abhängig von der Zyklentiefe ΔDOD ist [Fuc14, S. 178]. Ein Vollzyklus kann auch durch mehrmalige unvollständige Zyklen erreicht werden. Entsprechend der Herstellerangaben und einer Kurvenanpassung kann der Zusammenhang entsprechend (Gl. 5.11) für die betrachtete Batterie angenähert werden.

$$N_{Zyklen,batt} = 7,422 \cdot 10^4 e^{-0,03039 \cdot \Delta DOD} \quad (Gl. 5.11)$$

Diese Werte werden jedoch für Zellen gemessen, die durchgehend zwischen bestimmten Ladezuständen geladen und entladen werden. Im Hybridfahrzeug kann es aber auch vorkommen, dass die Batterie bspw. von 80% zu 50% entladen wird, dann auf 70% geladen und dann zu 45% entladen. Eine Berechnung der Zyklentiefe ist daher nicht eindeutig möglich.

Ein weiteres Alterungsmodell, das für die Zelle Sanyo UR18650E parametrisiert ist, berechnet die Kapazitätsänderung einer Batteriezelle $\Delta C_{zelle,Batt}$ aufgrund der zyklischen

Alterung über die Wurzel des Ladungsdurchsatzes und den Alterungsfaktoren $\beta_{zelle,Batt}$ (Gl. 5.12) [Sch14a, S. 330].

$$\Delta C_{zelle,Batt} = \beta_{zelle,Batt} \sqrt{Q_{zelle,Batt}} \quad (\text{Gl. 5.12})$$

Da der Zusammenhang zwischen Ladungsdurchsatz und Kapazitätsabnahme nicht linear ist, muss der gesamte Ladungsdurchsatz der Zelle ab Lebensbeginn $Q_{zelle,batt,0,t}$ gespeichert werden, um die Kapazitätsänderung, die durch den bereitzustellenden Ladungsdurchsatz $Q_{zelle,Batt}(P_{Batt})$ entsteht und damit die Leistung zu berechnen (Gl. 5.13). Der Ladungsdurchsatz ist der über die Zeit integrierte Strom der Zelle. Treten Messfehler bei der Messung des Stromes auf, addieren diese sich im Laufe der Zeit. Das Alterungsmodell wird also immer ungenauer.

$$\Delta C_{Batt}(P_{Batt}) = C_{zelle,Batt,0} - \beta_{zelle,Batt} \sqrt{Q_{zelle,batt,0,t} + Q_{zelle,Batt}(P_{Batt})} \quad (\text{Gl. 5.13})$$

Der Alterungsfaktor ist quadratisch von der Abweichung der durchschnittlichen Klemmenspannung einer Zelle von einem aus Alterungssicht ideal betrachteten mittleren Ladezustand $\emptyset U_{zelle,batt}$ und somit Spannung und linear von der Zyklentiefe ΔDOD_{Batt} abhängig (Gl. 5.14) [Sch14a, S. 330].

$$\beta_{zelle,Batt} = 7,348 \cdot 10^{-3} (\emptyset U_{zelle,batt} - 3,667)^2 + 7,6 \cdot 10^{-4} + 4,081 \cdot 10^{-3} \Delta DOD_{Batt} \quad (\text{Gl. 5.14})$$

Wie oben beschrieben, ist die Bestimmung der Zyklentiefe nicht einfach möglich. Die durchschnittliche Spannung der Batterie kann aus allen Werten seit Beginn des Entladens ermittelt werden. Allerdings benötigt das ein Speichern der vergangenen gemessenen Spannungen, sowie ausreichend gute Messtechnik. Folglich müssten bei dem beschriebenen Modell viele Daten genau gemessen werden und zwischengespeichert sowie aufwändig in jedem Berechnungsschritt berechnet werden.

Weitere Alterungsmodelle, wie bspw. [Fle12, S. 5–6], [Lep13], [Mar14, S. 6], berücksichtigen auch den Ladungsdurchsatz und weitere Gewichtungsfaktoren, wie die Zyklentiefe. Allerdings weicht die Parametrierung vom Modell von Schmalstieg ab, weil andere Lithium-Ionen Zellen betrachtet werden. Ein detailliertes Alterungsmodell für beliebige Lithium-Ionen Zellen besteht bisher nicht. Daher wird das einfache rechenarme und ohne die Speicherung von vielen Daten auskommende Alterungsmodell verwendet, das nur den Energiedurchsatz berücksichtigt. Dieses kann für unterschiedlichste Lithium-Ionen Batterien verwendet werden.

Um die Kosten-Leistungs-Funktion der Lithium-Ionen Batterie aufzustellen, muss deren aktuelle Leistungsgrenze bestimmt werden. Die aktuell bereitstellbare Leistung der Batterie wird üblicherweise durch das Batteriemanagementsystem berechnet [Sei14, S. 256–257]. Um eine genaue Prognose der Leistungsfähigkeit der Batterie zu machen, sind selbstadaptierende Verfahren, die sich durch kontinuierlichen Vergleich der Prognose mit gemessenen Werten und dem Batteriealter anpassen in Kombination mit möglichst exakten Messwerten der Batterie am genauesten [Sau07, S. 29].

Vereinfacht kann die Batterie als eine Ruhespannungsquelle mit einem Innenwiderstand beschrieben werden. Dann kann die verfügbare Leistung über die Ruhespannung $U_{Batt,0}$, den Innenwiderstand $R_{i,Batt}$ und den Entladestrom berechnet werden (Gl. 5.15) [Sau07, S. 19–20].

$$P_{Batt,entladen,max} = U_{Batt,0} I_{Batt,entladen,max} - R_{i,Batt} I_{Batt,entladen,max}^2 \quad (\text{Gl. 5.15})$$

Der maximale Entladestrom $I_{Batt,entladen,max}$ ist vor allem durch die minimale Batteriespannung begrenzt [Sau07, S. 20]. Wird die Leistung für den Berechnungszeitschritt gefordert, darf durch den maximalen Entladestrom zudem nicht die Ladezustandsgrenze unterschritten werden. Zusätzlich kann eine weitere Stromgrenze, bspw. um übermäßige Alterung zu vermeiden, vorliegen. Das Minimum aller Stromgrenzen wird als Stromgrenze in (Gl. 5.15) eingesetzt. Aus Sicht der minimalen Batteriespannung wird der maximale Entladestrom über die Entladeschlussgrenze $U_{Batt,min}$ und die sich durch den Strom einstellende Ruhespannung $U_{Batt,0}(t + \Delta t_{Berechnung})$, sowie den Innenwiderstand $R_{i,Batt}(t + \Delta t_{Berechnung})$ berechnet (Gl. 5.16) [Ple04, S. 1588].

$$I_{Batt,entladen,max,Umin} = \frac{U_{Batt,0}(t + \Delta t_{Berechnung}) - U_{Batt,min}}{R_{i,Batt}(t + \Delta t_{Berechnung})} \quad (\text{Gl. 5.16})$$

Der maximale Entladestrom, um die Ladezustandsgrenze nicht zu unterschreiten, berechnet sich über die untere Ladezustandsgrenze $SOC_{Batt,min}$, den aktuellen Ladezustand SOC_{Batt} , den Berechnungszeitschritt $\Delta t_{Berechnung}$ und die aktuelle Kapazität der Batterie C_{Batt} (Gl. 5.17) [Ple04, S. 1587].

$$I_{Batt,entladen,max,SOCmin} = \frac{SOC_{Batt} - SOC_{Batt,min}}{\frac{\Delta t_{Berechnung}}{C_{Batt}}} \quad (\text{Gl. 5.17})$$

Die Kosten-Leistungs-Funktion der Batterie, wenn nur das Laden der Batterie betrachtet wird, ist abgesehen von der Leistungsgrenze identisch der Kosten-Funktion des externen Netzes, wenn diese ausschließlich darüber geladen wurde (Abbildung 5.12). Wird die Batterie jedoch bspw. über den Verbrennungsmotor oder durch die Rekuperation der Elektromaschine geladen, verändert sich dieser Kostenanteil. Die Alterungskosten sind im Verhältnis zu den Ladekosten vergleichsweise gering, aber dennoch nicht vernachlässigbar.

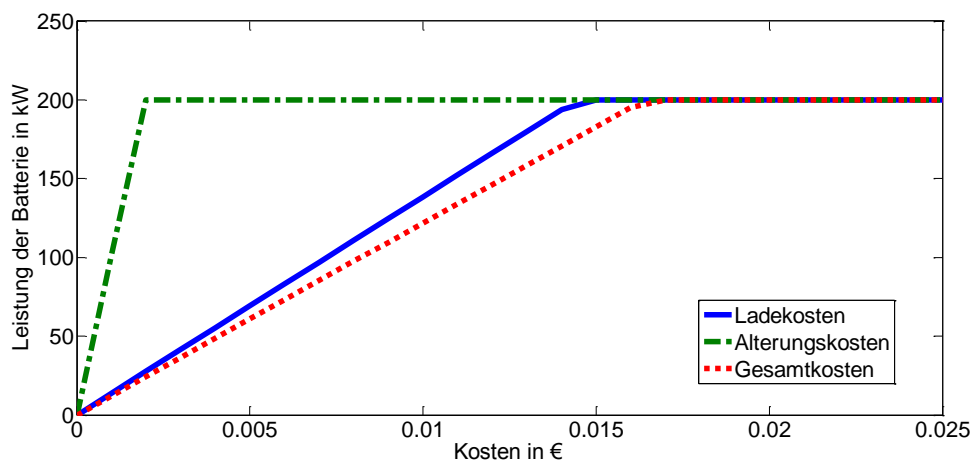


Abbildung 5.12: Kosten-Leistungs-Funktion der Batterie mit den Einkaufskosten beim Laden über das externe Netz, den Kosten für den alterungsbedingten Austausch nach 3600 Zyklen bei einer Leistungsgrenze von 200 kW und den Gesamtkosten als Summe der Lade- und Alterungskosten

5.2.2.5 Ultracapsystem

Betriebskosten der Ultracaps entstehen, wie bei der Batterie, bereits beim Laden. Im Vergleich zu Batterien ist die Alterung bei Ultracaps wegen des Speicherprinzips deutlich

geringer [Rei12, S. 208]. Es wird meist davon ausgegangen, dass Ultracaps während der gesamten Lebensdauer eines PKW nicht ausgetauscht werden müssen [Boh07, S. 626]. Da die Lebensdauer eines Nutzfahrzeugs im Vergleich zum PKW jedoch deutlich länger ist, werden im Folgenden die Kosten berechnet, wenn ein Austausch nötig wäre. Die Gesamtkosten berechnen sich dann über die Einkaufskosten $K_{Einkauf,UC}$ und Austauschkosten $K_{Austausch,UC}$, analog zu den Kosten der Batterie (Gl. 5.18).

$$K_{UC}(P_{UC}) = K_{Einkauf,UC}P_{UC} + K_{Austausch,UC}(P_{UC}) \quad (\text{Gl. 5.18})$$

Die durchschnittlichen Kosten zum Laden der Ultracaps $K_{UC,laden}$ werden ebenfalls über den durchschnittlichen Einkaufspreis für die Ladeleistung, ausgenommen rekuperierter Leistung, bezogen auf die Menge der Ladeleistung $P_{UC,laden}$ berechnet (Gl. 5.19). Die entstandenen Kosten zum Laden werden direkt weitergegeben für das Entladen.

$$K_{Einkauf,UC} = \frac{\int K_{UC,laden}(P_{UC,laden}) dt}{\int P_{UC,laden} dt} P_{UC} \quad (\text{Gl. 5.19})$$

Die Kosten für den alterungsbedingten Austausch werden über den von der Leistungsbereitstellung abhängigen Anteil der Alterung $\Delta Alterung_{UC}$ bis zum Lebensdauerende berechnet, wobei die Austauschkosten $K_{Austausch,UC}$ den Beschaffungskosten gleichgesetzt werden (Gl. 5.20).

$$K_{Austausch,UC}(P_{UC}) = \Delta Alterung_{UC}(P_{UC}) K_{Austausch,UC} \quad (\text{Gl. 5.20})$$

Für Ultracaps können pro kWh 12-mal höhere Beschaffungskosten gegenüber einer Lithium-Ionen Batterie gerechnet werden [Bur10, S. 140]. Der elektrische Energieinhalt der Ultracaps E_{UC} wird über die Nennspannung $U_{Nenn,UC}$ und die Kapazität C_{UC} berechnet (Gl. 5.21) [Bus11, S. 24]. Das im ENUBA Lkw verbaute Ultracapsystem beinhaltet 6 in Reihe geschaltete Ultracaps. Diese weisen jeweils eine Kapazität von 63 F auf [Max13]. Daher ergibt sich eine Gesamtkapazität von einem Sechstel der Einzelkapazitäten und somit 10,5 F [Bus11, S. 22]. Die Nennspannung des Gesamtsystems beträgt 750 V. Somit ergibt sich eine elektrische Energie von 0.8203 kWh. Mit der Annahme der 12-mal höheren Beschaffungskosten ergeben sich Austauschkosten von 2509 €.

$$E_{UC} = \frac{1}{2} C_{UC} U_{Nenn,UC}^2 \quad (\text{Gl. 5.21})$$

Vereinfacht wird der leistungsabhängige Anteil an der Alterung der Ultracaps über die Leistung P_{UC} im Berechnungsschritt $\Delta t_{Berechnung}$ bezogen auf die Energie, die beim kompletten Entladen bereitgestellt wird $E_{UC,HZ}$ und die Zyklenanzahl $N_{Zyklen,UC}$ berechnet (Gl. 5.22). Somit wird davon ausgegangen, dass die Alterung ausschließlich vom Energieumsatz abhängig ist.

$$\Delta Alterung_{UC}(P_{UC}) = \frac{P_{UC} \Delta t_{Berechnung}}{2 E_{UC,HZ} N_{Zyklen,UC}} \quad (\text{Gl. 5.22})$$

Die Energie, die beim kompletten Entladen, also einem Halbzyklus bereitgestellt wird $E_{UC,HZ}$, berechnet sich über die maximale Spannung des Ultracapsystems $U_{uc,max}$, die minimale Spannung $U_{uc,min}$ und die Kapazität der Ultracaps C_{UC} (Gl. 5.23) [Bur10, S. 134–135]. Die maximale gemessene Spannung bei einem Ladezustand von 100% beträgt 710 V, die minimale Spannung bei einem Ladezustand von 0 beträgt 300 V. Somit berechnet sich die Energie die bei einem Halbzyklus bereitgestellt wird zu 0.6039 kWh.

$$E_{UC,HZ} = \frac{1}{2} C_{UC} (U_{uc,max}^2 - U_{uc,min}^2) \quad (\text{Gl. 5.23})$$

Neben diesem vereinfachten Alterungsmodell liegen auch für Ultracaps detaillierte Untersuchungen vor, die zeigen, dass die Alterung auch deutlich von der Temperatur und der Spannung der Ultracaps abhängt [Boh07, S. 626–631]. So beschleunigen hohe Temperaturen und Spannungen den Kapazitätsverlust und den Innenwiderstandsanstieg. Dies könnte in die Berechnung mit einbezogen werden, hat jedoch einen erhöhten Rechenaufwand und führt ggf. nicht zu besseren Ergebnissen aufgrund möglicher Messfehler bei vielen zu speichernden Daten.

Die Kosten-Leistungs-Funktion des Ultracapsystems muss ebenfalls die Leistungsgrenzen berücksichtigen. Diese ergeben sich durch die Entladeschlussspannung und gegebenenfalls weitere Stromgrenzen, die von den Herstellern vorgesehen sind. Die maximal zu fordernde elektrische Leistung aus Sicht der Stromgrenze $P_{UC,entladen,max,I}$ ist das Produkt des maximalen Entladestroms $I_{entladen,max,uc}$ und der aktuellen Spannung $U_{UC,aktuell}$ (Gl. 5.24).

$$P_{UC,entladen,max,I} = U_{UC,aktuell} I_{entladen,max,uc} \quad (\text{Gl. 5.24})$$

Die Leistung $P_{UC,entladen,max,U}$, die durch die Entladeschlussgrenze $U_{uc,min}$ begrenzt ist, wird über die aktuell anliegende Klemmspannung $U_{UC,aktuell}$, den Berechnungsschritt $\Delta t_{Berechnung}$ und die Kapazität berechnet (Gl. 5.25).

$$P_{UC,entladen,max,U} = \frac{1}{2\Delta t_{Berechnung}} C_{UC} (U_{uc,aktuell}^2 - U_{uc,min}^2) \quad (\text{Gl. 5.25})$$

Die Alterungskosten haben, wenn überhaupt ein Austausch der Ultracaps nötig ist, einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Kosten-Leistungs-Funktion der Ultracaps zur Bereitstellung der elektrischen Leistung (Abbildung 5.13).

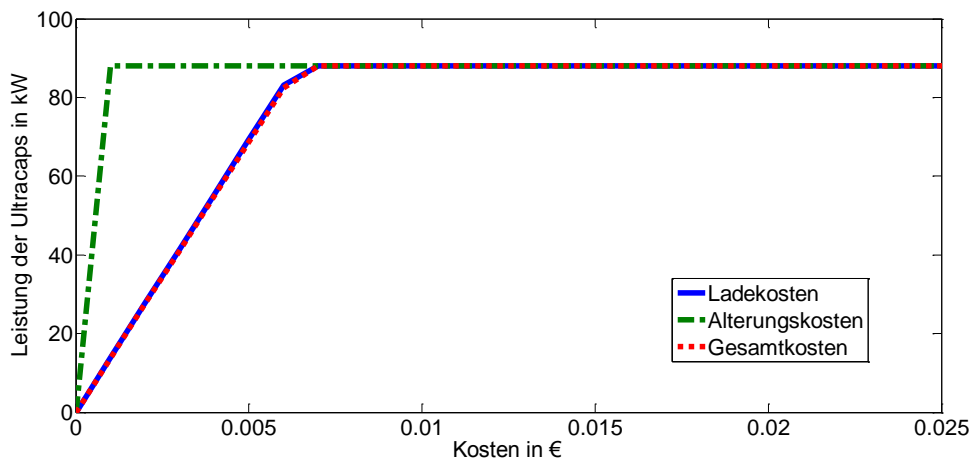


Abbildung 5.13: Kosten-Leistungs-Funktion der Ultracaps mit den Einkaufskosten beim Laden, den Kosten für den alterungsbedingten Austausch bei einer Leistungsgrenze von 88 kW und den Gesamtkosten

5.2.3 Energiekomponenten als Senken

Die Kostenleistungsfunktion einer Senke gibt die Priorität an, mit der die Leistung aufgenommen wird [Bui13, S. 351]. Dabei gibt es Senken, die immer versorgt werden müssen und mit höchster Priorität eingestuft werden [Bui13, S. 357]. Je höher die Funktionsrelevanz und Wahrnehmbarkeit für den Fahrer ist, umso höher sollte die Priorität der Versor-

gung dieser Senken sein [Büc08, S. 31]. Die Priorität aller Senken wird in drei Klassen eingeteilt (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Prioritätsklassen der Senken

Prioritätsklasse	1	2	3
Bedeutung	hohe Priorität	mittlere Priorität	niedrige Priorität
Energieaufnahme der Senke	muss garantiert werden	abhängig von den Kosten	nur bei sehr niedrigen Preisen
Beispielhafte Senke	Traktion	Speicher	Bremswiderstand

Hat eine Senke die Priorität 1, bedeutet das, dass hohe Kosten entstehen können, damit diese Energiekomponente versorgt wird (Abbildung 5.14). Bei Senken mit niedrigerer Priorität muss der Handelspreis niedriger sein, damit Leistung bezogen werden kann.

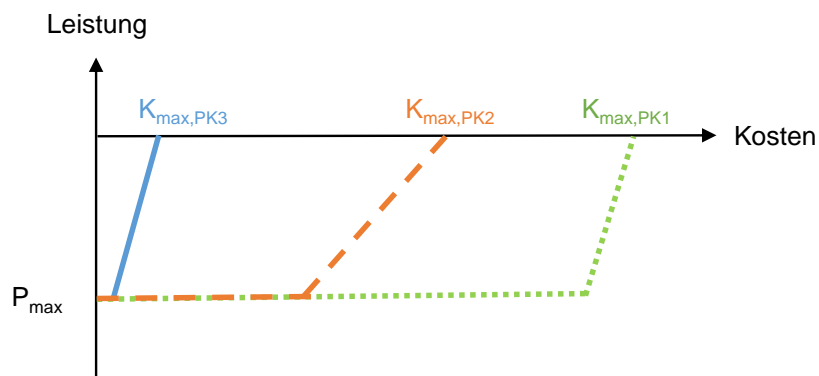


Abbildung 5.14: Vergleich von Kosten-Leistungs-Funktionen mit unterschiedlichen Prioritätsklassen

Um sicherzustellen, dass Senken mit der Prioritätsklasse 1 versorgt werden, müssen die maximalen Kosten dieser Senken gleich $Kosten_{P_{max}, \Sigma Quellen}$ entsprechen (Abbildung 5.15, Oben und Mitte). Diese Kosten entsprechen den minimal auftretenden Kosten für die Bereitstellung der maximal möglichen Leistung durch die Summe aller Quellen. Ist die Summe der aufzunehmenden Leistung der Senken mit Prioritätsklasse 1 kleiner der Leistung, die durch die Summe der Quellen bereitgestellt werden kann, können Senken mit einer niedrigeren Priorität zusätzlich versorgt werden (Abbildung 5.15 links). Ist die Summe der aufzunehmenden Leistung der Senken mit Prioritätsklasse 1, jedoch gleich der Leistung, die maximal durch die Summe der Quellen bereitgestellt werden kann, werden nur die Quellen mit Prioritätsklasse 1 versorgt (Abbildung 5.15 rechts). Die Kosten-Leistungs-Funktionen der Senken werden somit mit Prioritätsklassen beschrieben, die durch konkrete Kosten ersetzt werden, sobald die summierte Quellenfunktion berechnet wurde.

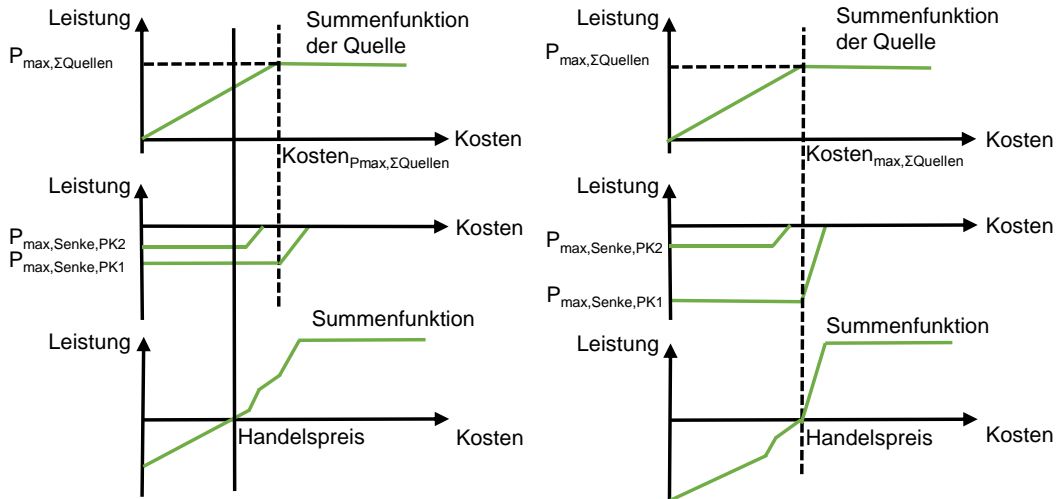


Abbildung 5.15: Bestimmung der Kosten für Prioritätsklasse 1, damit diese die maximale Leistung der Quellen aufnehmen können und weitere Senken nur bei niedrigeren Kosten Leistung beziehen (links) und sonst keine Leistung beziehen (rechts)

Senken mit der Prioritätsklasse 3 sollen nur dann Energie aufnehmen, wenn dies durch die Summe alle anderen Senken nicht mehr möglich ist. Daher dürfen die Kosten nur einen sehr kleinen maximalen Wert besitzen. Dieser ist, entsprechend der Diskretisierungsstufe der Kosten, gleich dem kleinsten Wert größer Null. Eine monetäre Bewertung der Priorität der Senken mit der Prioritätsklasse 2 ist nicht direkt möglich. Vielmehr müssen diese Senken relativ zueinander in Subklassen innerhalb der Klasse 2, die von den Kosten zwischen der Prioritätsklasse 1 und 3 liegen, bewertet werden. Die Kosten für Senken in Prioritätsklasse 2 können somit nur in Relation zu den Kosten der Senken in Prioritätsklasse 1 und 3 fahrzeugspezifisch aufgestellt werden.

5.2.3.1 Traktion

Der Fahrer übermittelt seinen Beschleunigungswunsch, der durch den Abgleich zwischen gewünschter Geschwindigkeit und aktueller Fahrzeuggeschwindigkeit entsteht, durch die Gaspedalstellung [Fug09, S. 7–8]. Der Beschleunigungswunsch entspricht einem gewünschten Antriebsmoment [Mau02, S. 118–120]. Durch das gewünschte Antriebsmoment und die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit kann der sich während der Fahrt ständig ändernde Leistungsbedarf für den Antrieb berechnet werden [Jör09, S. 124].

Um die Betriebskosten, die aufgrund der Leistungsverteilung durch das flexible Energiemanagement am simulierten Fahrzeug entstehen mit denen durch das eingesetzte Energiemanagement im Realfahrzeug vergleichen zu können, muss der Leistungsbedarf des Antriebs gleich groß sein [Mei14, S. 4]. Nur wenn die umgesetzte Antriebs- und Bremsleistung gleich ist, wird auch in der Simulation die gleiche Geschwindigkeit wie beim Realfahrzeug erzielt. Folglich wird in der Simulation dieselbe Fahrsteuerung wie im Realfahrzeug implementiert. In der Fahrsteuerung wird, wie in [Mei14, S. 4] im Detail beschrieben, aus der Gaspedalstellung und der Fahrzeuggeschwindigkeit die geforderte Antriebsleistung berechnet. Der Vergleich zwischen Simulation und Messung bei gleichen Fahrereingaben und Geschwindigkeiten zeigt, dass die Fahrsteuerung denselben Leistungsbedarf in der Simulation wie im Realfahrzeug berechnet und somit verifiziert ist [Mei14, S. 9].

Da die Leistungsaufnahme zum Antreiben des Fahrzeugs direkt der Erfüllung des Fahrerwunsches dient, wird die Senke Traktion mit der Prioritätsklasse 1 bewertet. Somit wird die vom Fahrer geforderte Leistung bis zu den minimalen Kosten der maximalen Leistung der Summe der Quellen durch die Kosten-Leistungs-Funktion der Traktion als Senke gefordert (Abbildung 5.16).

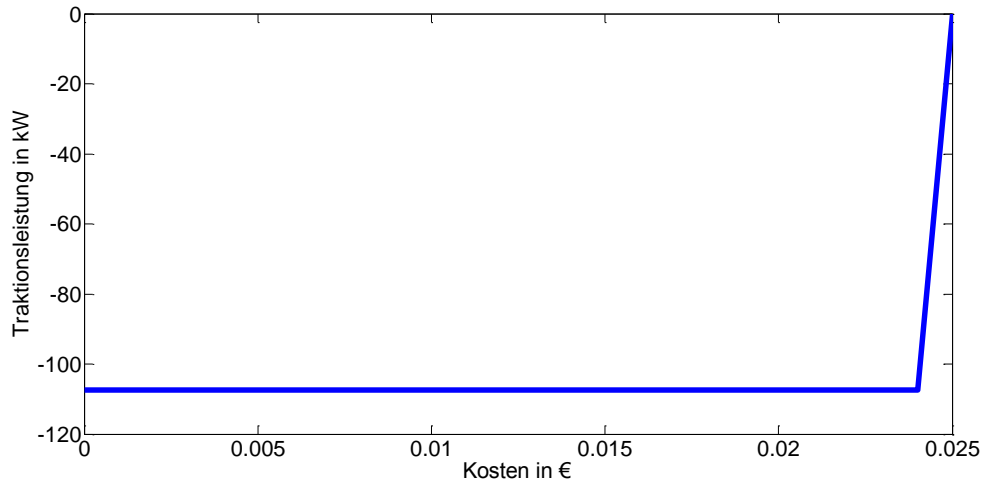


Abbildung 5.16: Kosten-Leistungs-Funktion der Traktion als Senke, wenn der umgerechnete Fahrerwunsch 107 kW beträgt und die minimalen Kosten für die maximal bereitstellbare Leistung der Summe der Quellen 0,024 €

Soll es möglich sein, dass unter bestimmten Umständen mehr Leistung durch den Traktionsmotor bereitgestellt wird, muss dies in der Kosten-Leistungs-Funktion abgebildet werden. Das kann dann der Fall sein, wenn kurzzeitig ein elektrischer Traktionsmotor abhängig von der aktuellen Temperatur in Überlast betrieben wird oder bei einem parallelen Hybrid mit steigender Leistungsfähigkeit der Batterie kurzzeitig mehr Leistung zusätzlich zum Verbrennungsmotor im Boostbetrieb bereitgestellt wird. Damit die Senke Traktion, wenn kostengünstig mehr Leistung zur Verfügung steht, mehr Leistung aufnehmen kann, kann die Kosten-Leistungs-Funktion verändert werden (Abbildung 5.17). Das hat jedoch zur Folge, dass der Fahrerwunsch hinsichtlich der Beschleunigung unter verschiedenen Umständen unterschiedlich gedeutet wird.

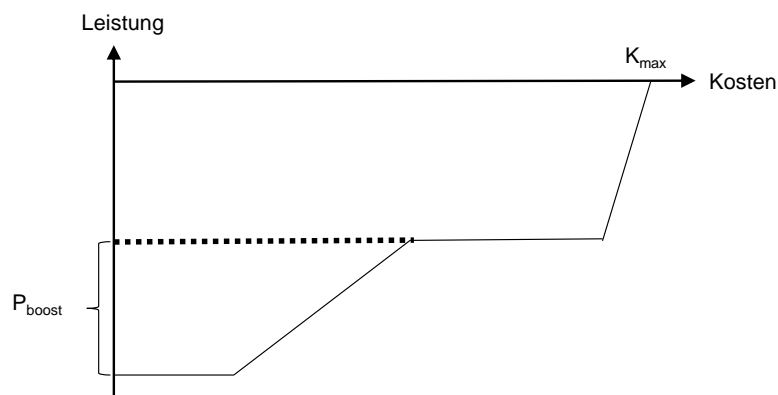


Abbildung 5.17: Kosten-Leistungs-Funktion der Traktion mit Boost-Funktion

5.2.3.2 Nebenverbraucher

Neben dem Antrieb als größte Senke in Bezug auf die durchschnittliche und maximale Leistungsaufnahme müssen die Nebenverbraucher als weitere Senken im System betrachtet werden. Elektrifizierte Nebenverbraucher haben den Vorteil, dass sie bedarfsgerecht an- und ausgeschaltet werden können. Dennoch ist meist eine optimale Energiebereitstellung der Reduzierung der Verbraucherleistung vorzuziehen, solange der Bedarf vorliegt [Rei14, S. 226]. Die Nebenverbraucher eines Fahrzeugs können nach [Bra05, S. 314] in Kategorien entsprechend der Funktionspriorität eingeteilt werden (Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Klassifizierung der Nebenverbraucher nach Funktionspriorität nach [Bra05, S. 314]

Funktions-Priorität	Kategorie	Beispiel
1	Sicherheitsfunktionen	Licht, Bremssystem
2	Funktionen für Notlaufeigenschaften	Steuergeräte
3	Basisfunktionen	Einspritzsystem, Kühlerlüfter
4	Standard-Komfortverbraucher	Innenraumlüftung, Stellmotoren für Spiegelverstellung
5	Erweiterte Luxus- und Komfortverbraucher	Sitzheizung, Navigation

Dabei kann zwischen abschaltbaren und nicht abschaltbaren Nebenverbrauchern unterschieden werden [Fab06, S. 10]. Senken, die Sicherheitsfunktionen, Funktionen für Notlaufeigenschaften und Basisfunktionen übernehmen, müssen immer mit der geforderten Leistung versorgt werden. Bspw. können das Außenlicht, die Blinker oder die Scheibenwischer aus Sicherheitsgründen nicht abgeschaltet werden [Fab06, S. 10], [Büc08, S. 31]. Senken innerhalb der genannten Kategorien haben zwar unterschiedliche Funktionspriorität, jedoch können ihnen innerhalb des Energiemanagements nicht unterschiedliche Prioritäten zugewiesen werden, weil sie letztendlich nicht abgeschaltet werden können. Somit erhalten diese Senken Prioritätsklasse 1.

Innerhalb der Komfortverbraucher kann zwischen solchen unterschieden werden, die sobald sie ausgeschaltet werden, durch den Fahrer wahrnehmbar sind und solchen die nicht direkt wahrnehmbar sind. Werden Senken wie bspw. das Navigationssystem abgestellt, wird dies sofort negativ durch den Kunden wahrgenommen [Fab06, S. 10]. Daher werden Komfortverbraucher, die direkt durch den Fahrer wahrnehmbar sind, sobald sie nicht mehr die benötigte Leistung aufnehmen können, ebenfalls der Prioritätsklasse 1 zugeordnet.

Komfortverbraucher mit einer hohen Funktionsträgheit, also Speicherfähigkeit einer Verbraucherfunktion, reagieren erst stark verzögert auf eine Änderung der Leistungszuführung [Büc08, S. 26]. Die Verfügbarkeit der Funktion eines solchen Verbrauches wird nur gering durch eine kurzzeitige Leistungsänderung beeinflusst. Daher wird dies vom Nutzer nicht als Komforteinbuße wahrgenommen [Büc08, S. 26]. Lange Zeitkonstanten weisen thermische Nebenverbraucher wie z.B. die Heizung auf. Diese Senken sind daher am besten für eine befristete Begrenzung der Leistungsaufnahme geeignet [Eng09, S. 75–76], [Fab06, S. 10], [Sch09, S. 34], [Büc08, S. 26]. Bspw. geht [Sch09, S. 34] davon aus, dass erst eine Temperaturänderung von 3 K wahrnehmbar ist. Auch ein Druckluftkompressor kann kurzzeitig abgeschaltet werden, wenn der Luftdruck nicht eine untere Gren-

ze unterschreitet. Die genannten Nebenverbraucher können daher auch kurzfristig der Prioritätsklasse 2 zugeordnet werden.

Nach einer bestimmten Zeit, dann wenn die Leistungsbegrenzung durch den Fahrer wahrnehmbar wird, müssen die Komfortnebenverbraucher allerdings von Prioritätsklasse 2 in die Prioritätsklasse 1 wechseln. So kann sich bspw. die Priorität der Versorgung der Sitzheizung in Abhängigkeit der Fahrgastraumtemperatur und der Dauer des Betriebes ändern [Büc08, S. 72–73]. Steigt die Priorität, wird von der betrachteten Senke allerdings mehr Leistung benötigt, um den gewünschten Zustand, wie eine bestimmte Temperatur, zu erreichen. Da die Kosten-Leistungs-Funktionen stetig sein müssen (Kapitel 5.2.1), bedeutet das, dass die Funktionen der Senken zumindest steile Gradienten zwischen den Leistungsanforderungen besitzen müssen [Büc08, S. 79]. Daher können nur kontinuierlich steuerbare Verbraucher eingesetzt werden.

Analog zur Traktion wird der gleiche Leistungsbedarf für die Nebenverbraucher in der Simulation wie beim Realfahrzeug in den Messungen angenommen, um die Betriebskosten, die aufgrund der Leistungsverteilung durch das flexible Energiemanagement entstehen, mit denen durch das eingesetzte Energiemanagement im Realfahrzeug vergleichen zu können. In dem Fall müssen alle Nebenverbraucher mit der Prioritätsklasse 1 bewertet werden. Dadurch entsteht eine zur Traktion als Senke ähnliche Kosten-Leistungs-Funktion (Abbildung 5.18).

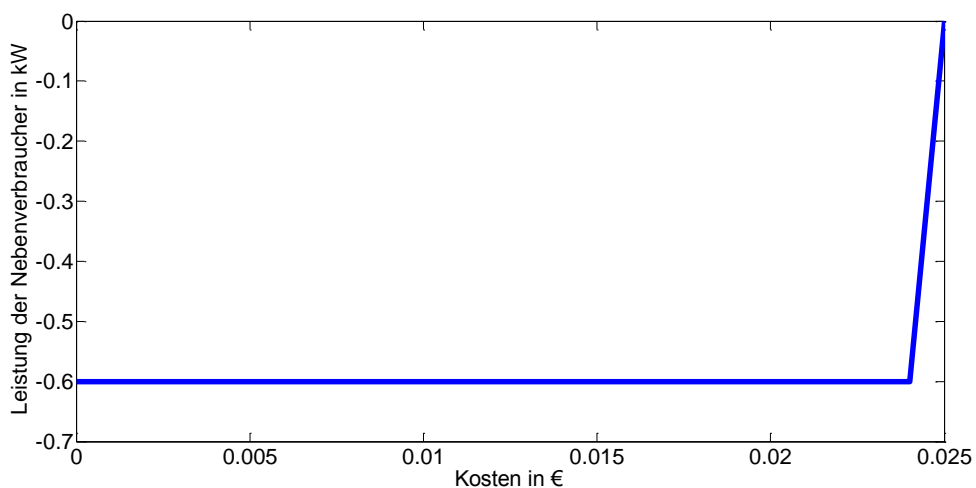


Abbildung 5.18: Kosten-Leistungs-Funktion der Nebenverbraucher, wenn der aktuelle Bedarf 600 W ist und alle Nebenverbraucher die Prioritätsklasse 1 besitzen und die Kosten für die maximal bereitstellbare Leistung der Summe der Quellen 0,024 € beträgt

Würde ein Teil der Nebenverbraucher abschaltbar sein, würden sich zwei Möglichkeiten für die Gestaltung der Kosten-Leistungs-Funktion ergeben (Abbildung 5.19). In beiden Fällen würde allerdings ab dem minimalen Preis, ab dem die maximale Leistung durch die Summe der Quellen bereitgestellt werden kann ($K_{\max, \Sigma \text{NVB}}$), der Leistungsanteil der Nebenverbraucher gefordert werden, der Prioritätsklasse 1 besitzen ($P_{\text{NVB}, \text{PK}1}$). Entweder könnte die Kosten-Leistungs-Funktion für niedrigere Preise linear ansteigen, von der maximal aufzunehmenden Leistung der Summe aller Nebenverbraucher ($P_{\Sigma \text{NVB}, \text{max}}$), bis zur Leistung der Nebenverbraucher mit Prioritätsklasse 1. Dann würde, je kostengünstiger der Handelspreis ist, umso mehr Leistung durch die Summe der Nebenverbraucher aufgenommen werden. Möglich wäre auch eine Kosten-Leistungs-Funktion, bei der nur bis zu den Kosten $K_{\max, \text{NVB}, \text{PK}2}$ die Senken mit Prioritätsklasse 2 Leistung aufnehmen können.

Diese Kosten sind allerdings schwer monetär zu bewerten und müssten in Relation zu anderen Senken in Prioritätsklasse 2 aufgestellt werden.

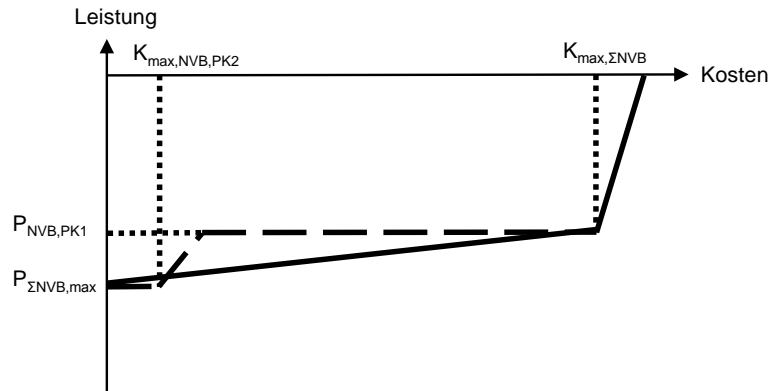


Abbildung 5.19: Kosten-Leistungs-Funktion der Nebenverbraucher bei verschiedenen Prioritätsklassen

5.2.3.3 Elektrische Speicher

Die Ladeleistung der elektrischen Speicher hängt, unter Berücksichtigung der maximalen Ladeleistung, von den entstehenden Kosten ab. So sollte mehr Leistung zum Laden der elektrischen Speicher aufgenommen werden, wenn diese kostengünstig im Handel bereitsteht. Wird bspw. rekuperiert und so durch die Traktion quasi kostenlose Energie bereitgestellt, sollte diese, sofern die Nebenverbraucher mit Prioritätsklasse 1 ausreichend Leistung beziehen, soweit möglich vom Speicher aufgenommen werden. Sind die Kosten für Leistung im Fahrzeug jedoch hoch, soll der Speicher wenig bis gar nicht geladen werden. Zudem hängt die Priorität der Versorgung der elektrischen Speicher vom Ladezustand ab. Die beiden Extrempunkte werden durch den Ladezustand 0% und 100% beschrieben. Ist der elektrische Speicher bereits vollgeladen, nimmt er bei allen Kosten keine Leistung auf. Ist der Speicher jedoch komplett entladen, gibt dieser im Handel die maximale Priorität an.

Der elektrische Speicher hat die Prioritätsklasse 2 und somit maximale Prioritäten zwischen den minimalen Kosten $K_{Senke, PK3}$, bei denen die maximal mögliche Leistung aufgenommen werden soll (Abbildung 5.20) und den minimalen Kosten für die maximale Leistungsbereitstellung der Summe der Quellen $K_{Senke, PK1}$. Letzteres entspricht den Kosten, die Senken mit der Prioritätsklasse 1 maximal zahlen. Zu diesen Kosten, soll der Speicher nicht mehr geladen werden, weil er nur die Prioritätsklasse 2 aufweist. Vereinfacht wird angenommen, dass die maximalen Kosten zur Leistungsaufnahme linear in dem Bereich zwischen $K_{Senke, PK3}$ und $K_{Senke, PK1}$ entsprechend des Ladezustands aufgeteilt werden. Des Weiteren wird angenommen, dass die Leistungsaufnahme linear mit den steigenden Kosten abnimmt.

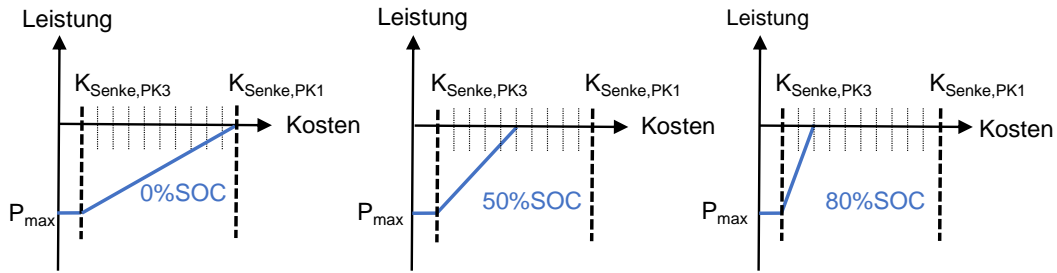


Abbildung 5.20: Kosten-Leistungs-Funktionen des elektrischen Speichers in Abhängigkeit vom Ladezustand

Wie auch beim Entladen, gibt es für das Laden einer Batterie eine Leistungsgrenze, die durch den maximalen Ladestrom $I_{Batt,laden,max}$ vorgegeben ist. Dieser hängt mit der maximalen Ladeleistung $P_{Batt,laden,max}$ über die Ruhespannung und den Innenwiderstand der Batterie zusammen (Gl. 5.26). Der maximale Ladestrom hängt von mehreren Faktoren ab. Daher wird das Minimum des Ladestroms entsprechend dieser Faktoren verwendet.

$$P_{Batt,laden,max} = U_{Batt,0} I_{Batt,laden,max} - R_{i,Batt} I_{Batt,laden,max}^2 \quad (\text{Gl. 5.26})$$

Zusätzlich wird, um übermäßige Alterung zu vermeiden, eine Stromgrenze vom Hersteller in die Berechnung übernommen, die vom Ladezustand abhängt. Zudem ist der maximale Ladestrom vor allem durch die maximale Batteriespannung begrenzt [Sau07, S. 20]. Diese wird über die Spannung $U_{Batt,0}(t + \Delta t_{Berechnung})$ und den Ruhewiderstand $R_{i,Batt}(t + \Delta t_{Berechnung})$, der sich durch den Ladevorgang ergeben würde, und die Ladeschlussgrenze $U_{Batt,max}$ in Form der maximalen Spannung, berechnet (Gl. 5.27). Hierbei wird der Ladestrom negativ definiert.

$$I_{Batt,laden,max,Umin} = \frac{U_{Batt,0}(t + \Delta t_{Berechnung}) - U_{Batt,max}}{R_{i,Batt}(t + \Delta t_{Berechnung})} \quad (\text{Gl. 5.27})$$

Zudem darf durch den Ladestrom die Ladezustandsgrenze nicht überschritten werden. Der maximale Ladestrom, um die Ladezustandsgrenze $SOC_{Batt,max}$ nicht zu überschreiten, hängt von dem aktuellen Ladezustand SOC_{Batt} , der aktuellen Kapazität der Batterie C_{Batt} und dem Berechnungsschritt $\Delta t_{Berechnung}$ ab (Gl. 5.28) [Ple04, S. 1587].

$$I_{Batt,laden,max,SOCmin} = \frac{SOC_{Batt} - SOC_{Batt,max}}{\frac{\Delta t_{Berechnung}}{C_{Batt}}} \quad (\text{Gl. 5.28})$$

Bei einem Ladezustand von 100% ist die Kosten-Leistungs-Funktion der Batterie als Senke gleich Null (Abbildung 5.21). Bei einem sehr hohen Ladezustand von 90% ist die maximale Ladeleistung bereits gering. Aber auch, wenn die Batterie komplett leer ist, wird vom Hersteller eine geringe maximale Ladeleistung vorgegeben.

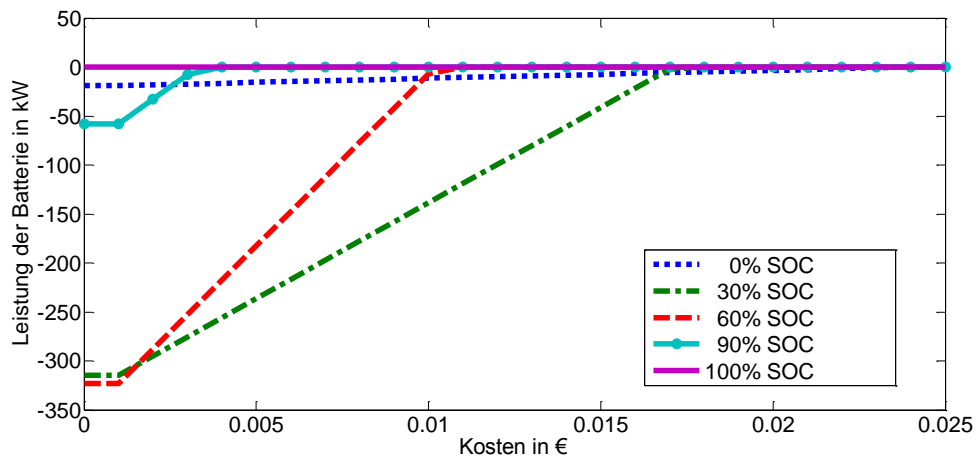


Abbildung 5.21: Kosten-Leistungs-Funktion der Batterie als Senke für verschiedene Ladezustände und die sich ergebenden Leistungsgrenzen

Die maximal zulässige Ladeleistung des Ultracapsystems ergibt sich aus dem Minimum der maximalen Ladeleistung, die durch den Strom begrenzt ist und der maximalen Ladeleistung, die durch die Ladeschlussspannung begrenzt ist. Die maximale durch den Strom begrenzte Ladeleistung $P_{UC,laden,max,I}$ wird über die aktuelle Spannung $U_{UC,aktuell}$ und den maximalen Ladestrom $I_{laden,max,uc}$ berechnet (Gl. 5.29).

$$P_{UC,laden,max,I} = U_{UC,aktuell} I_{laden,max,uc} \quad (\text{Gl. 5.29})$$

Die Ladeschlussgrenze $U_{uc,max}$ begrenzt mit der aktuell anliegenden Klemmspannung $U_{uc,aktuell}$, den Berechnungsschritt $\Delta t_{Berechnung}$ und der Kapazität C_{UC} die maximale Ladeleistung $P_{UC,laden,max,U}$ (Gl. 5.30).

$$P_{UC,laden,max,U} = -\frac{1}{2\Delta t_{Berechnung}} C_{UC} (U_{uc,max}^2 - U_{uc,aktuell}^2) \quad (\text{Gl. 5.30})$$

Der Aufbau der Kosten-Leistungs-Funktion des Ultracapsystems als Senke ist bis auf die Leistungsgrenzen und den sich daraus ergebenden Verlauf gleich dem der Batterie (Abbildung 5.22).

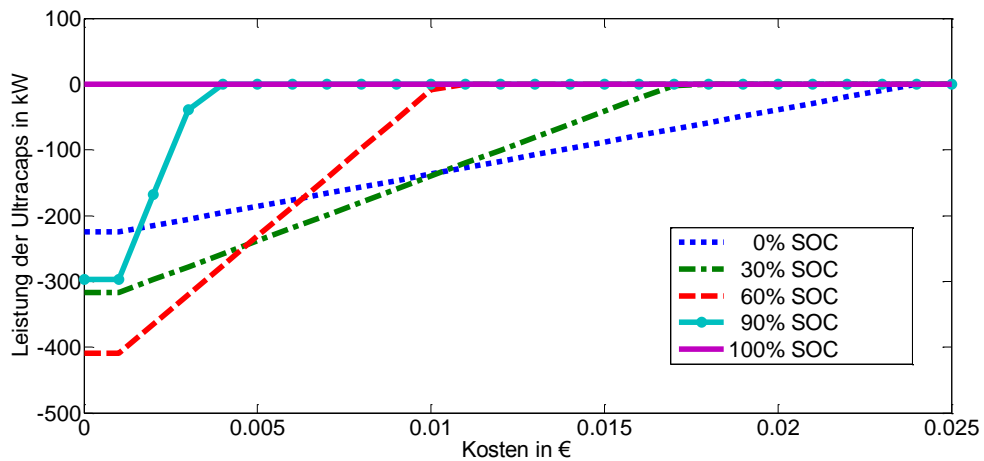


Abbildung 5.22: Kosten-Leistungs-Funktion der Ultracaps als Senke für verschiedene Ladezustände und die sich ergebenden Leistungsgrenzen

5.2.4 Speicher als Quelle und Senke

Einige Energiekomponenten können im Energiehandel als Quelle oder als Senke berücksichtigt werden. Das Energiemanagement muss aber sicherstellen, dass alle Komponenten eine eindeutige Leistungsvorgabe, entweder zur Leistungsbereitstellung oder zur Leistungsaufnahme zugewiesen bekommen. Daher müssen diese Komponenten in jedem Zeitschritt entweder eine Quelle oder eine Senke darstellen.

Wenn Bremsenergie rekuperiert und über die Traktionsmaschine gewandelt wird, speist diese elektrische Leistung ein und die Traktion wirkt als Quelle am Energieknotenpunkt. Treibt die Elektromaschine hingegen das Fahrzeug an, wirkt die Traktion als Senke am Energieknotenpunkt. Entsprechend der Fahrereingaben durch das Gas- und Bremspedal wird allerdings bereits direkt vorgegeben, ob diese Energiekomponente eine Quelle oder eine Senke darstellt. Diese direkte Fahrereingabe erfolgt aber nicht für elektrische Speicher wie die Batterie oder Ultracaps.

Bei elektrischen Speichern können jedoch nicht einfach beide Kosten-Leistungs-Funktionen, als Quelle und als Senke, gleichzeitig dem Handel zugeführt werden, weil beim Handel alle Kosten-Leistungs-Funktionen summiert werden. Durch die Addition entsteht zwar eine eindeutige Funktion für den Speicher, die mit dem Handelspreis festlegt, ob geladen oder entladen wird (Abbildung 5.23). Allerdings entsprechen die den positiven Leistungen zugehörigen Kosten nicht mehr den entstehenden Betriebskosten und die Kosten der negativen Leistungswerte nicht mehr der Priorität zum Laden des Speichers.

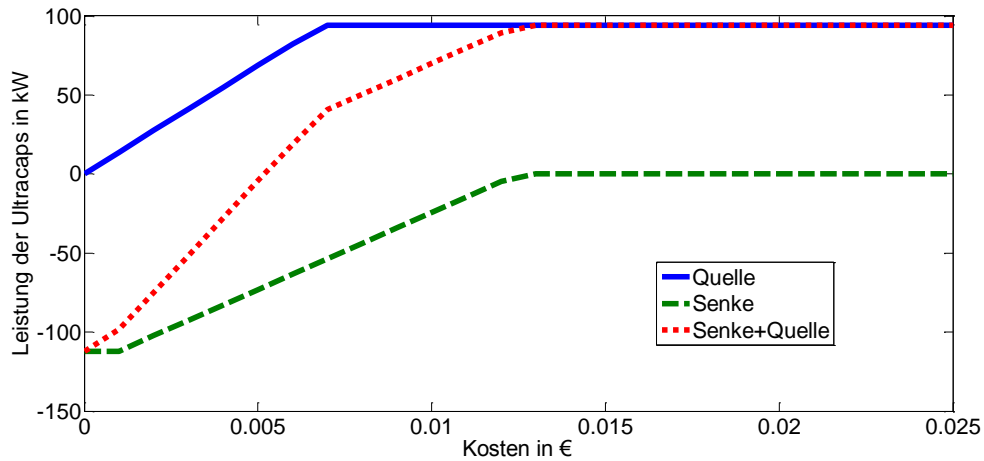


Abbildung 5.23: Kosten-Leistungs-Funktionen der Ultracaps als Quelle und als Senke bei einem Ladezustand von 50 %, sowie die Addition beider Funktionen

Stattdessen werden für einen elektrischen Speicher, zwei Handel, einmal mit dem elektrischen Speicher als Quelle und einmal als Senke, berechnet und anschließend festgelegt, welche Leistungsvorgaben tatsächlich umgesetzt werden. Die Summenfunktionen haben eine unterschiedliche Gestalt, je nach Einsatz des elektrischen Speichers (Abbildung 5.24).

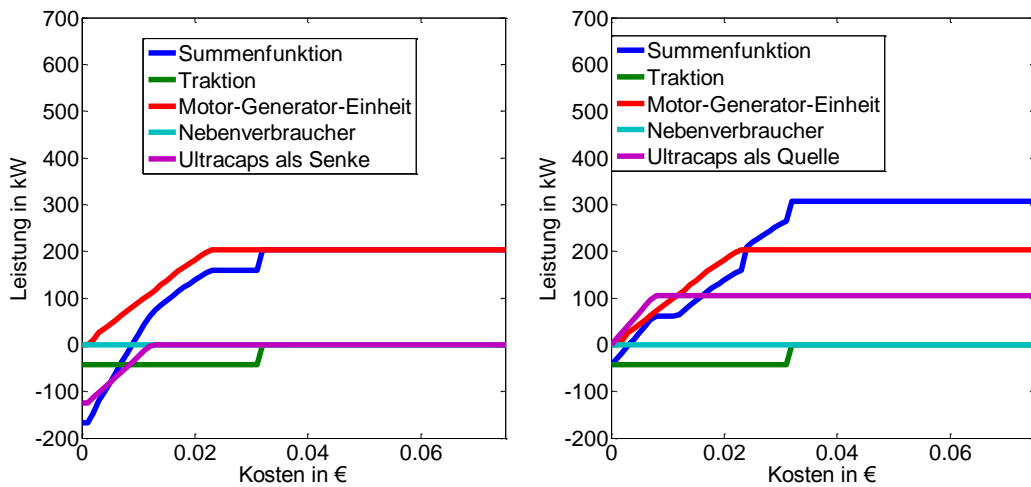


Abbildung 5.24: Kosten-Leistungs-Funktionen der Energiekomponenten und die entstehende Summenfunktion unter Berücksichtigung der Kosten-Leistungs-Funktion des Ultracapsystems als Senke (links) und als Quelle (rechts)

Bei dem Handel, bei dem der elektrische Speicher als Senke fungiert, ist die Summenfunktion bei einem höheren Handelspreis gleich Null. Das liegt daran, dass eine Senkenfunktion die Leistungswerte der Summenfunktion bei den gleichen Kosten herabsetzt und eine Quellenfunktion diese vergrößert. Durch eine weitere Senke entsteht ein weiterer Bedarf, der kostenpflichtig gedeckt wird. Würde also immer der Handel zur tatsächlichen Leistungsvorgabe gewählt werden, bei dem geringere Betriebskosten entstehen, würde der Speicher komplett entladen werden. Erst dann wäre die Quellenfunktion gleich Null und der Speicher würde geladen werden, um im nächsten Zeitschritt direkt wieder entladen zu werden. Nur in dem Fall, in dem kostenlose Leistung bereitgestellt wird, würde der Speicher geladen, weil diese Leistung bereits vor dem Handel von der Senkenfunktion abgezogen wird.

Ein Ziel des Energiemanagement ist es jedoch, die dauerhafte Entladung der Batterie zu verhindern [Rei14, S. 226]. Viele Arbeiten gehen davon aus, dass es einen optimalen Ladebereich gibt, in dem der elektrische Speicher gehalten werden sollte [Gru10, S. 13–14], [Sal07, S. 2393], [Pis07, S. 507], [Che05, S. 428], [Bia11, S. 7], [Sch02, S. 461]. Dieser wird meist im Bereich zwischen 50-80% SOC für einen parallelen Hybrid definiert [Mus05b, S. 1818], [Pag02, S. 2077], [Rei10a, S. 57–58].

Ein vergleichsweise hoher Ladezustand ist vor allem bei einem parallelen Hybrid wichtig, um die Leistungsfähigkeit des elektrischen und hybriden Fahrens beizubehalten [Ehs05, S. 262], [Rei10a, S. 57–58], [Böc08, S. 18]. Die untere Ladezustandsgrenze ergibt sich somit aus der Leistungsfähigkeit des Antriebs. Soll bspw. bei einem parallelen Hybrid sichergestellt werden, dass für eine bestimmte Zeit eine bestimmte maximale Antriebsleistung garantiert wird, darf der Speicher nicht unter einen bestimmten Ladezustand fallen, weil nur dann die nötige maximale Entladeleistung des Speichers für die Antriebsleistung gewährleistet wird (Kapitel 5.2.2.4 bzw. 5.2.2.5). Wird bei einem seriellen Hybrid die Antriebsleistung bei der Motor-Generator-Einheit nochmal verbaut, kann der Ladezustand des Speichers theoretisch bis auf 0% herabsinken. Beim ENUBA Lkw und beim Innotruck ist die maximale Antriebsleistung des Traktionsmotors jedoch etwas größer als die maximale Leistung der Motor-Generator-Einheit. Daher dürfen die Ultracaps nicht unter einen Ladezustand von ca. 30% fallen, damit die volle Antriebsleistung zumindest für einen Berechnungsschritt bereitgestellt werden kann. Ist die betrachtete Batterie des Innotrucks verbaut, darf der Ladezustand bis maximal auf 18% herabsinken, damit die maximale Antriebsleistung für einen Berechnungsschritt bereitgestellt werden kann. Die betrachtete Batterie kann auch noch bei einem niedrigeren Ladezustand im Vergleich zum Ultracap die nötige Differenzleistung zwischen maximaler Antriebsleistung und maximaler Leistung der Motor-Generator-Einheit bereitstellen.

Der Ladezustand sollte aber auch nicht zu hoch sein, damit möglichst viel kostengünstige Bremsenergie rekuperiert werden kann [Rei10a, S. 57–58], [Böc08, S. 18], [Ser09a, S. 121]. Zudem führt bei Batterien ein mittlerer Ladezustand zur geringsten kalendarischen Alterung [Eck14, S. 845], [Jos06, S. 141]. Das Energiemanagement sollte daher dafür sorgen, dass der Batterieladezustand in einem Bereich zwischen zwei Betriebsgrenzen gehalten wird, ohne dauerhaft an einer Grenze zu sein [Ser09a, S. 121].

Die Entscheidung, ob der Speicher als Quelle oder Senke eingesetzt werden soll, kann daher von der um den Ladezustand gewichteten Differenz der Handelspreise ΔHP abhängig gemacht werden (Abbildung 5.25). Der Handel mit dem Speicher als Senke ist in jedem Fall kostengünstiger als der Handel mit dem Speicher als Quelle. Dadurch ergibt sich eine positive Handelspreisdifferenz. Diese wird mit dem Gewichtungsfaktor für den aktuellen Ladezustand gewichtet und zum Handelspreis mit dem Speicher als Quelle addiert. Ist der Handelspreis mit dem Speicher als Senke dann immer noch kleiner oder gleich dem um das Produkt von Handelspreisdifferenz und Gewichtungsfaktor erhöhte Handelspreis des Speichers als Quelle soll der Speicher als Senke wirken.

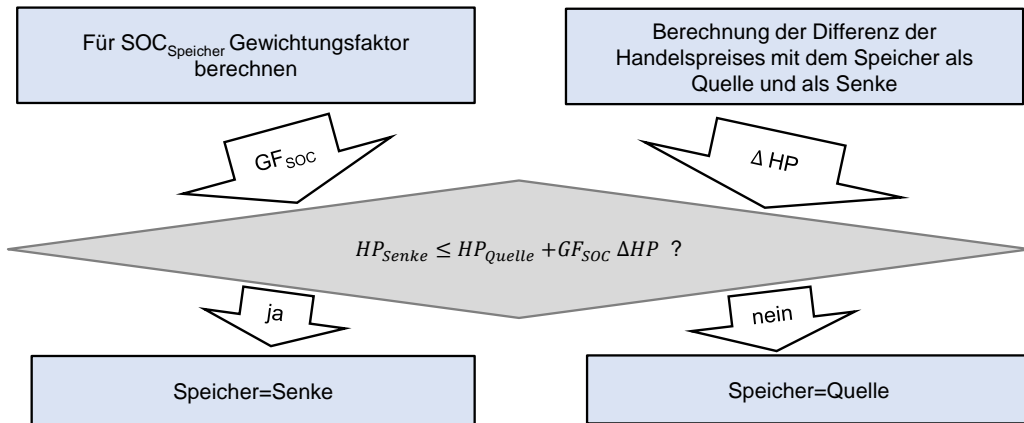


Abbildung 5.25: Entscheidungsablauf zur Festlegung eines Speichers als Quelle oder als Senke

Der Gewichtungsfaktor für den Ladezustand GF_{SOC} liegt im Bereich $[0 \dots 1]$. Bei der unteren Ladezustandsgrenze ist dieser gleich 1. Dadurch wird sichergestellt, dass der Speicher als Senke in den Handel eingeht. Ab dem gewünschten Ladezustand ist der Gewichtungsfaktor für den Ladezustand gleich Null, so dass der Speicher nur dann als Senke wirkt, wenn kostenlose Energie verfügbar ist. Vereinfacht wird der lineare Verlauf des Gewichtungsfaktors für den Ladezustand angenommen (Abbildung 5.26). Bis zu einem Ladezustand von 30% wird somit der Handel mit dem Speicher als Senke bevorzugt, um die maximale Antriebsleistung für einen Berechnungsschritt bereitstellen zu können. Ab einem Ladezustand von 70% wird der Handel mit dem Speicher als Senke nicht mehr weiter durch einen Gewichtungsfaktor unterstützt.

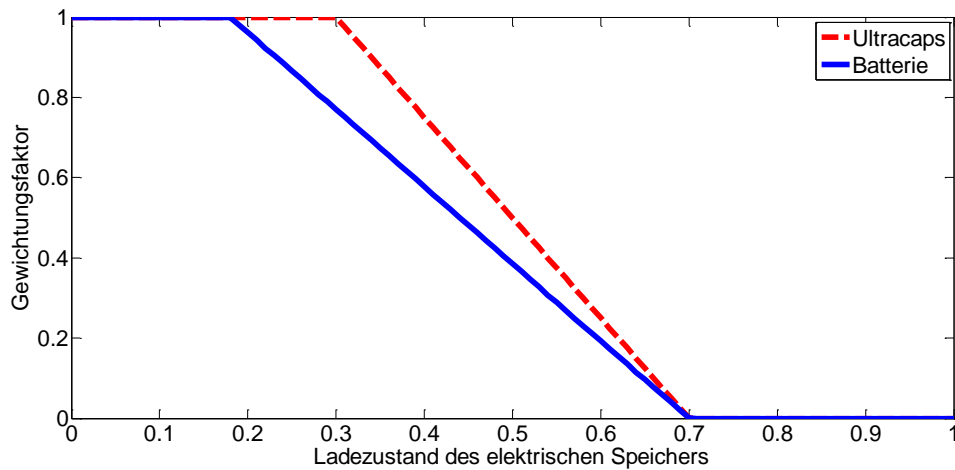


Abbildung 5.26: Gewichtungsfaktor für den Ladezustand für die Ultracaps des ENUBA Lkw und die Batterie des Innotrucks

Neben dem Entscheidungskriterium (Gl. 5.31) muss zudem geklärt werden, ob überhaupt ein Handel mit dem Speicher als Quelle zustande kommen kann. Fordern die Summe der Senken mit Priorität 1 mehr Leistung, als durch die weiteren Quellen ohne den Speicher bereitgestellt werden kann, wäre die Summenfunktion zu allen Kosten negativ. Das liegt daran, dass die maximalen Kosten für die Senken mit Priorität 1 auf Basis der Summe aller Quellenfunktionen aufgestellt werden. Kommt ein Handel mit dem Speicher als Senke nicht zustande, muss dieser als Quelle wirken.

6 Hybridfahrzeugsimulationsmodell

Um das flexible Energiemanagement zu untersuchen, wird das im nachfolgenden beschriebene Fahrzeugmodell aufgebaut. Die Parametrierung des Modells erlaubt die Darstellung des Referenzfahrzeuges, des ENUBA Lkw. Zudem wird ein Batteriemodell aufgebaut, um die Anzahl bzw. Ausprägung der Komponenten verändern und eine andere Fahrzeugvariante, den Innotruck, darstellen zu können.

6.1 Modellierung eines modularen Hybridfahrzeugs

In der Fahrsimulation wird zwischen einem vorwärtsgerichteten und einem rückwärtsgerichteten Längsdynamikmodell unterschieden. Das vorwärtsgerichtete Fahrzeugmodell beinhaltet ein Fahrermodell, welches das Fahrzeug beschleunigt, verzögert oder eine konstante Fahrgeschwindigkeit einregelt. Die Simulation ist kausal. Im Gegensatz dazu wird im weniger komplexen und rechenintensiven rückwärtsgerichteten Fahrzeugmodell ausgehend von der fahrwiderstandsabhängigen Bedarfsleistung an den Rädern zu den Betriebspunkten der Antriebsstrangkomponenten gerechnet [Fug09, S. 11], [Kes07, S. 20], [Kop08, S. 11–13], [Ste12, S. 208], [Bac05, S. 55–56], [Sti08, S. 13].

Bei dem beschriebenen Fahrzeugmodell handelt es sich um ein vorwärts gerichtetes Längsdynamikmodell. Der für den Antrieb relevante Teil des Fahrermodells ist wie bei [Böc08, S. 24], [Chr06, S. 54], [Mau02, S. 119] ein PI-Regler, der als Regelabweichung die Differenz aus der Geschwindigkeitsvorgabe vom Fahrzyklus und der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit berücksichtigt. Daraus generiert der Fahrerregler einen Wert für die Fahrpedalstellung und das Bremspedal, der jeweils zwischen Null und Eins liegt [Böc08, S. 24]. Somit wird durch die Betätigung der Fahrpedale eine Minimierung zwischen Soll-Geschwindigkeitsvorgabe und Ist-Geschwindigkeit des Fahrzeugs vorgenommen [Fug09, S. 21–22]. Für die Energiemanagementuntersuchungen ist kein detailliertes Fahrermodell, das fahrerindividuell differenziert handelt [Mül02, S. 20–25], nötig, weil nicht der Einfluss des Fahrers auf die Betriebskosten, sondern der Einfluss der Energieverteilung im Fahrzeug auf die Betriebskosten bei einem gegebenen Fahrprofil und somit Leistungsbedarf des Traktionsmotors untersucht werden soll. Ein Retarderhebel wurde im Fahrermodell nicht implementiert, weil nicht allgemeingültig berechnet werden kann, wann ein Fahrer diesen statt des Bremspedals zum Verzögern verwendet, ohne ein fahrerindividuelles Modell zu entwickeln. Allerdings kann dem Modell auch statt des Fahrprofils direkt die Fahrereingaben inklusive der Retarderstellung der Fahrsteuerung vorgegeben, die alle Eingaben berücksichtigen kann. Zudem gibt das Fahrermodell Vorgaben für einige Nebenverbraucher vor.

Die in der Simulation berücksichtigten Umweltdaten sind die Temperatur, der Luftdruck und der Steigungswinkel der Straße. Der Sinus des Steigungswinkels wird während der Fahrt über die Höhendifferenz Δh und die Wegdifferenz Δs , die innerhalb des jeweiligen Zeitschrittes zurückgelegt wird nach (Gl. 6.1) berechnet.

$$\sin \alpha = \frac{\Delta h}{\Delta s} \quad (\text{Gl. 6.1})$$

Die Höhe des Wegs wird über eine Kennlinie, wie in einer Karte, nachgeschlagen. Der zurückgelegte Weg wird im Teilmodell Umwelt über die Fahrzeuggeschwindigkeit, die zu den Zustandsdaten der Energiekomponente Traktion gehört, bestimmt.

Fahrereingaben, Umweltdaten und Zustandsdaten der Fahrzeugenergiekomponenten werden vom flexiblen Energiemanagement berücksichtigt (Abbildung 6.1). Alle Energiekomponenten sind über die Energieverteilung verbunden, über den die Leistung zwischen den Quellen und Senken ausgetauscht werden kann. Im Modell der Energieverteilung wird die Summe der Leistungen, die von allen Energiekomponenten aufgenommen und abgegeben werden, addiert. Beträgt dieser Wert gleich Null, wird die Anforderung an eine ausgeglichene Energiebilanz vom Energiemanagement erfüllt und es wird genauso viel Leistung von den Quellen gefordert, wie auch von den Senken aufgenommen wird.

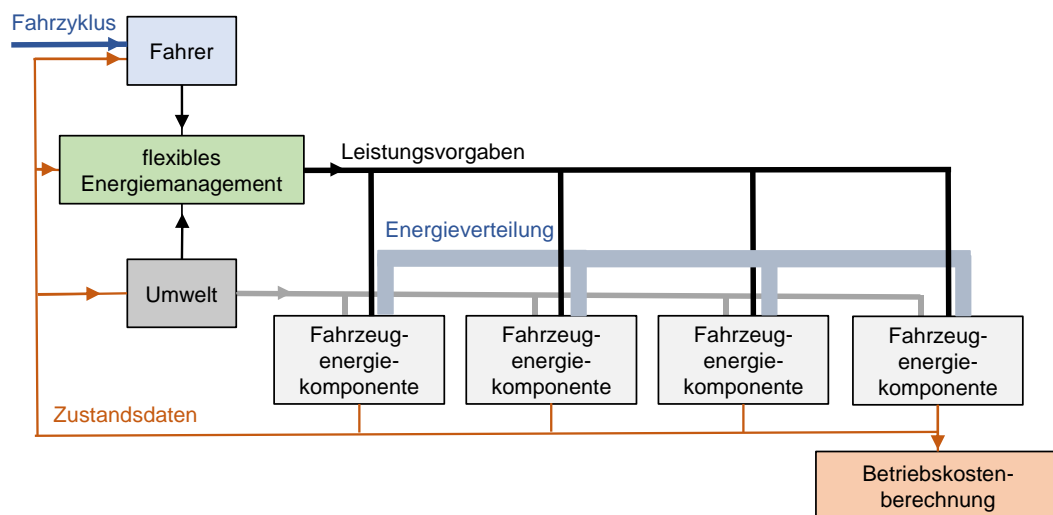


Abbildung 6.1: Aufbau des modularen Hybridfahrzeugmodells

Damit anhand des Hybridfahrzeugmodells Varianten des flexiblen Energiemanagements untersucht werden können, müssen elektrische und mechanische Energieflüsse abgebildet werden, die Möglichkeit zur Implementierung und zum Testen des Verfahrens vorhanden, eine flexible Bedatung möglich sein und schnelle Rechenzeit ermöglicht werden, um innerhalb überschaubarer Zeiträume Parametervarianten simulieren zu können [Böc08, S. 22]. Einzelne verifizierte Modelle der Komponenten müssen frei miteinander kombiniert werden können, um beliebige Antriebstrangtopologien und Fahrzeugvarianten zu simulieren [Fug09, S. 12], [Eng09, S. 52]. Daher ist das entwickelte Fahrzeugmodell modular und parametrierbar. Jede Energiekomponente im Fahrzeugmodell ist als eigenes Teilmodell aufgebaut, das eine definierte Schnittstelle für das Energiemanagement aufweist (Abbildung 6.1). Die Energiekomponenten erwarten eine Vorgabe vom flexiblen Energiemanagement, die die bereitzustellende bzw. aufzunehmende Leistung für jeden Berechnungsschritt angibt. In den Komponentenmodellen wird die Leistungsvorgabe des Energiemanagements, soweit physikalisch möglich, umgesetzt. Bei Energiekomponenten, die elektrische Senken darstellen, wird die Funktion abgebildet, die diese mit der vorgegebenen bereitzustellenden elektrischen Leistung umsetzt. Innerhalb der Energiekomponentenmodelle der elektrischen Quellen werden jeweils die Zustandsdaten berechnet, die relevant sind für die Berechnung der Betriebskosten, die durch die Ansteuerung des Energiemanagements entstehen. In der Betriebskostenberechnung werden die während der Fahrt entstandenen Betriebskosten der einzelnen Quellen berechnet und summiert.

Simulationsmodelle von Fahrzeugen können in mikroskopische und makroskopische Modelle unterteilt werden [Ade09, S. 19]. In einem mikroskopischen Modell werden die Fahrzeugkomponenten durch mathematische Modelle mit einer sehr kleinen Rechenschrittweite, bis zu einem Bereich von μs , dargestellt [Ade09, S. 19]. Eine Beschreibung von sehr schnellen Vorgängen, wie Schaltvorgänge der eingesetzten Halbleiter, können für die

Untersuchung des Energiemanagements vernachlässigt werden [Pis05a, S. 67], [Wag04, S. 57]. Daher werden für die Durchführung von Systembetrachtungen, wie beim Energiemanagement, so wie auch in dieser Arbeit, makroskopische Modelle eingesetzt. Die Rechenzeitschritte sind in der Regel 0,1-1 Sekunde [Ade09, S. 19]. In den Untersuchungen von [Gru10, S. 75] und [Kle03, S. 73] werden bspw. Berechnungsschrittweiten von 0,1 Sekunden verwendet, wohingegen andere Arbeiten eine Berechnungsschrittweite von 1 Sekunde als einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und notwendiger Rechenleistung erachten [Büc08, S. 58], [Ebb12, S. 11], [Elb14, S. 44]. In dem Hybridfahrzeugmodell dieser Arbeit wird eine feste Simulationsschrittweite von 1 Sekunde gewählt, weil in dieser Zeit alle Energiekomponenten, sofern sie in Betrieb sind, den geforderten Leistungswunsch des Energiemanagements dezentral umsetzen können und eine neue Leistungsanforderung immer in einem definierten Zeitabstand gesendet wird. Die Regelung auf den Steuergeräten der Komponenten wird nicht modelliert. Die Zeit zur Umsetzung der Befehle ist deutlich kürzer als die Zeitabstände, bis neue Vorgaben vom Energiemanagement gestellt werden.

Insgesamt hat sich im Forschungs- und Entwicklungsbereich eine blockschaltorientierte Implementierung von Fahrzeugmodellen durchgesetzt. Hierzu wird meist MATLAB und SIMULINK vom Hersteller MathWorks verwendet [Pro12, S. 138], [Hal03, S. 18–19]. Dies wird auch für die vorliegende Arbeit verwendet, um das Fahrzeugmodell aufzubauen. Weitere typische Simulationswerkzeuge sind Modelica/Dymola, AVL-Cruise und GT-Drive [Hof10, S. 214].

6.2 Energiekomponentenmodell

Die Fahrzeugkomponenten werden bei makroskopischen Modellen mittels Kennlinien, Kennlinienfeldern oder durch einfache Berechnungen modelliert [Ade09, S. 19]. Die kennfeldbasierte Abbildung der Fahrzeugkomponenten ist vor allem deswegen zur Untersuchung für Energiemanagementstrategien etabliert, weil die benötigten Daten meist gut verfügbar sind und hohe Simulationsgeschwindigkeiten erreicht werden [Fug09, S. 22], [Lan07, S. 123]. Zudem ist die Abbildung über Kennfelder für Energiemanagementuntersuchungen meist genau genug [Sam13, S. 22–23]. Bei der kennfeldbasierten Abbildung handelt es sich um eine quasistationäre Modellierung [Ste12, S. 8], [Sam13, S. 22–23], [Hof10, S. 213–214]. Dynamische Modelle hingegen werden mit Differenzialgleichungen beschrieben [Ste12, S. 8], [Hof10, S. 213–214], [Sti08, S. 13–14]. Sie sind rechenintensiver während der Simulation, wohingegen bei einer kennfeldbasierten Abbildung die Berechnung oder Messung bereits vorab stattfindet [Ste12, S. 8]. Dynamische Modelle von Komponenten werden meist über Ersatzschaltbilder modelliert, wobei die Struktur abstrahiert und mit elektrischen Grundelementen (Widerstände, Spannungsquellen, etc.) abgebildet wird [Lan07, S. 123]. Je mehr elektrische Grundelemente verwendet werden, umso genauer ist das Modell, allerdings steigt auch der Parametrierungsaufwand [Fle10, S. 132]. Die in dieser Arbeit aufgebauten Komponentenmodelle sind entsprechend der verfügbaren Daten zur Parametrierung und dem Rechenaufwand teilweise dynamisch und teilweise quasistationär. Die Modellierungsdetaillierung richtet sich zudem nach den Effekten, die in den Berechnungsschritten beobachtbar sind.

6.2.1 Motor-Generator-Einheit

Die Motor-Generator-Einheit bekommt durch das Energiemanagement, wenn sie Leistung bereitstellen soll, die Vorgabe, die positive Leistung P_{MGU} zu liefern. Da der Verbren-

nungsmotor bei einem seriellen Hybrid mechanisch nicht mit der Antriebswelle des Fahrzeugs gekoppelt ist, kann er in einem beliebigen Betriebspunkt betrieben werden. Das Motor-Generator-Modell beinhaltet ein Kennfeld, das für jede Leistungsanforderung ein bestimmtes Moment vom Generator M_{GEN} und zugleich eine bestimmte Drehzahl vom Verbrennungsmotor n_{VBM} fordert. Das Moment des Verbrennungsmotors M_{VBM} ergibt sich über die Übersetzung i_G und den Wirkungsgrad η_G des Hochsetzgetriebes [Kle11, S. 12]:

$$M_{VBM} = \frac{M_{GEN}}{i_G \eta_G} \quad (\text{Gl. 6.2})$$

Zugleich ergibt sich die Drehzahl des Generators n_{GEN} über die Drehzahl des Verbrennungsmotors n_{VBM} und die Übersetzung des Hochsetzgetriebes i_G [Kle11, S. 12]:

$$n_{GEN} = \frac{n_{VBM}}{i_G} \quad (\text{Gl. 6.3})$$

Die abgegebene elektrische Leistung der Motor-Generator-Einheit wird über das Moment M_{GEN} , die Drehzahl n_{GEN} und den Wirkungsgrad des Generators berechnet (Gl. 6.4) [Eva12, S. 531]. Der Wirkungsgrad wird über ein Kennfeld in Abhängigkeit des Moments und der Drehzahl des Generators ermittelt.

$$P_{el,GEN} = 2\pi M_{GEN} n_{GEN} \eta_{GEN} \quad (\text{Gl. 6.4})$$

Die gelieferte Leistung der Motor-Generator-Einheit ist gleich dem Produkt aus der elektrischen Leistung des Generators und dem Wirkungsgrad des Inverters $\eta_{Inverter}$:

$$P_{MGU} = P_{el,GEN} \eta_{Inverter} \quad (\text{Gl. 6.5})$$

Für den Verbrennungsmotor wird die an die Kurbelwelle abgegebene Nennleistung P_{VBM} über das Moment M_{VBM} und die Drehzahl n_{VBM} des Verbrennungsmotors berechnet [Bra13, S. 224]:

$$P_{VBM} = 2\pi M_{VBM} n_{VBM} \quad (\text{Gl. 6.6})$$

In einem Verbrauchskennfeld wird der spezifische Kraftstoffverbrauch b_e über die abgegebene Nennleistung P_{VBM} und die Drehzahl des Verbrennungsmotors ermittelt. Ist die geforderte Leistung gleich Null, aber die Motor-Generator-Einheit im Betrieb, wird der Leerlaufverbrauch angenommen. Sonst wird der Kraftstoffmassenstrom \dot{m}_{Diesel} über die die geforderte Leistung und den spezifischen Verbrauch berechnet [Bra13, S. 225]:

$$\dot{m}_{Diesel} = b_e P_{VBM} \quad (\text{Gl. 6.7})$$

Danach wird der Kraftstoffmassenstrom \dot{m}_{Diesel} über die Kraftstoffdichte ρ_{Diesel} zu einem Kraftstoffvolumenstrom \dot{V}_{Diesel} umgerechnet [Ade09, S. 39]. Der Volumenstrom wird im Tankmodell über die Zeit zu dem Kraftstoffverbrauch V_{Diesel} in Litern aufsummiert:

$$V_{Diesel} = \int \dot{V}_{Diesel} = \int \frac{\dot{m}_{Diesel}}{\rho_{Diesel}} \quad (\text{Gl. 6.8})$$

6.2.2 Externes Netz und Nebenverbraucher

Das externe Netz kann im Modell bis zu einem Grenzwert Leistung bereitstellen. Diese ist jedoch nicht dauerhaft verfügbar, sondern nur dann, wenn das Fahrzeug mit einer Oberleitung oder einer stationären Ladesäule verbunden ist. Wirkungsgradverluste im Netz selber werden nicht abgebildet, weil sie im Strompreis abgebildet sind.

Die Nebenverbraucher werden über einen zeitvarianten Leistungsbedarf abgebildet, der sich entsprechend der Messwerte ständig ändert.

6.2.3 Traktion

Entsprechend des flexiblen Energiemanagements wird eine Bremskraft für die mechanische Bremse und eine elektrische Leistung $P_{el,EM}$ berechnet, die die Elektromaschine bereitstellt bzw. aufnimmt (Abbildung 6.2). Aus der elektrischen Leistung und der aktuellen Drehzahl der Elektromaschine n_{EM} ergibt sich ein Antriebsmoment bzw. Bremsmoment M_{EM} , das die Elektromaschine bereitstellt bzw. aufnimmt. Dieses liegt mit einer Übersetzung von der Achse und dem Radradius als Kraft am Rad vor. Am Rad kann zudem über die mechanische Bremse eine Bremskraft anliegen. Die Kraft, die sich durch die Elektromaschine und die mechanische Bremse an den Rädern ergibt, F_{Rad} , wird im Submodell Fahrphysik den Fahrwiderstandskräften des Fahrzeugs gegenübergestellt, wobei hier auch die Steigungsdaten aus dem Umweltmodell einfließen. Im Teilmodell Fahrphysik wird somit die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet, die Eingangswert des Fahrermodells ist. Das Traktionsmodell besteht somit aus dem Modell der Elektromaschine, der Achse, der mechanischen Bremse, dem Rad und der Fahrphysik [Mei14, S. 3].

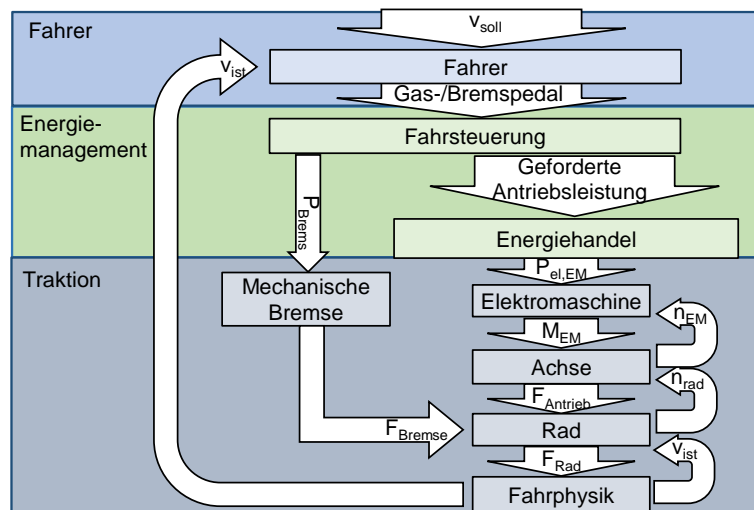


Abbildung 6.2: Signalflüsse im Traktionsmodell und zwischen Traktion, Fahrer und Energiemanagement zur Traktion

Der bidirektionale Betrieb der Elektromaschine wird im Modell dadurch abgebildet, dass das Antriebsmoment positiv definiert ist und das Bremsmoment negativ. Das Submodell Elektromaschine besteht erstens aus der Überprüfung der Leistungsgrenzen, zweitens der Berücksichtigung der Wirkungsgradverluste der Leistungselektronik des zugehörigen Inverters und drittens der Berechnung des resultierenden Moments, das der Motor bereitstellt bzw. aufnimmt. Somit bildet das Modell des elektromotorischen Antriebs analog zu [Böc08, S. 29] sowohl den elektrischen als auch den mechanischen Teil über ein Wirkungsgradkennfeld ab, weil die genauen Vorgänge in der Elektromaschine für das Energiemanagement nicht von Bedeutung sind.

Im Submodell Achse wird das durch die Elektromaschine verursachte Moment am Rad $M_{Rad,EM}$ berechnet (Gl. 6.9). Dabei ist i_{Achse} die Übersetzung und η_{Achse} der Wirkungsgrad im gesamten Antriebsstrang zwischen dem Traktionsmotor und den Rädern [Kle11, S. 15].

$$M_{Rad,EM} = M_{EM} i_{Achse} \eta_{Achse} \quad (Gl. 6.9)$$

Die Drehzahl des Traktionsmotors ergibt sich über die Übersetzung zwischen dem Rad und der Elektromaschine (Gl. 6.10) [Kle11, S. 11].

$$n_{EM} = n_{Rad} i_{Achse} \quad (\text{Gl. 6.10})$$

Neben der Bremswirkung der Elektromaschine im Generatorbetrieb wird das Fahrzeugmodell durch die mechanische Betriebsbremse gebremst. Durch die Betätigung des Bremspedals wird das Bremsmoment der Betriebsbremse vorgegeben. Es ist das Produkt aus Reibungskräften zwischen der Bremse und der Brems Scheibe und dem Abstand der Angriffspunkte von der Drehachse [Rei10b, S. 25]. Bei Nutzfahrzeugen über 7,5 t Gesamtgewicht wird Druckluft zur Erzeugung der erforderlichen Spannkraften an den Radbremsen verwendet [Hoe13, S. 277]. Da es für die Untersuchungen zum Energiemanagement nicht nötig ist, die Vorgänge in der Druckluft-Bremsanlage detailliert abzubilden, wird die mechanische Bremse über eine einfache Kennlinie modelliert, die die entstehende Bremskraft über die Bremspedalstellung abbildet. Insgesamt hängt die Verzögerung von der Leistungsfähigkeit der Bremsanlage und den Haftbedingungen zwischen Reifen und Fahrbahn ab [Hoe13, S. 268]. Mit der Kennlinie wird allerdings nur die Leistungsfähigkeit der Bremsanlage, nicht aber verschiedene Haftbedingungen abgebildet.

Da Fahrstabilitätsaspekte nicht im Vordergrund der Energiemanagementuntersuchungen stehen, kann vereinfacht ein Ein-Rad-Modell verwendet werden [Bac05, S. 47/48]. Am Rad wirkt das Antriebs- oder Bremsmoment von der Elektromaschine, das über den dynamischen Reifenradius r_{dyn} einer Kraft entspricht [Hak11, S. 13]. Neben der Elektromaschine kann die mechanische Bremse mit einer negativen Bremskraft F_{Brems} auf die Räder wirken, so dass die Antriebs- bzw. Bremskraft am Rad F_{Rad} berechnet wird (Gl. 6.11).

$$F_{Rad} = \frac{M_{Rad,EM}}{r_{dyn}} + F_{Brems} \quad (\text{Gl. 6.11})$$

Das Submodell geht davon aus, dass die zur Verfügung stehende Antriebskraft bzw. Bremskraft am Rad immer auf die Straße übertragen werden kann und somit (Gl. 6.12) immer gilt, also die Achslast F_N mit dem Kraftschlussbeiwert μ multipliziert immer kleiner als die Kraft am Rad ist.

$$F_{Rad} < \mu F_N \quad (\text{Gl. 6.12})$$

Über die Fahrzeuggeschwindigkeit wird im Submodell Rad die Raddrehzahl über den dynamischen Reifenradius berechnet (Gl. 6.13) [Hak11, S. 13]. Hierbei wird der Schlupf am Rad vernachlässigt, weil er bei Lkw nur eine sehr geringe Auswirkung auf den Leistungsbedarf des Traktionsmotors hat.

$$n_{Rad} = \frac{v_{Fzg}}{2\pi r_{dyn}} \quad (\text{Gl. 6.13})$$

Über ein Kräftegleichgewicht am Rad wird der Beschleunigungswiderstand F_a durch die Antriebs- bzw. Bremskraft am Rad F_{Rad} , den Luftwiderstand F_{Luft} , den Rollwiderstand F_{Roll} und den Steigungswiderstand F_{Steig} berechnet [Hoe13, S. 38]:

$$F_a = F_{Rad} - F_{Luft} - F_{Roll} - F_{Steig} \quad (\text{Gl. 6.14})$$

Im Traktionsmodell wird mit (Gl. 6.15) die Beschleunigung bzw. Verzögerung berechnet. Mithilfe der Beschleunigung bzw. Verzögerung und der Geschwindigkeit im vorherigen Zeitschritt kann die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeugs ermittelt werden. Diese ist die Ausgangsgröße des Submodells.

Um ein Fahrzeug zu beschleunigen oder zu verzögern, muss eine Kraft aufgebracht werden, welche die Trägheit überwindet. Dazu muss das Fahrzeug nicht nur translatorisch, sondern drehende Teile im Fahrzeug auch rotatorisch beschleunigt oder verzögert werden. Die Beschleunigungskraft F_a berechnet sich über die Masse des Fahrzeugs m_{Fzg} , die translatorische Beschleunigung a und den Drehmassenzuschlagsfaktor λ [Hoe13, S. 43]:

$$F_a = m_{Fzg} a \lambda \quad (\text{Gl. 6.15})$$

Der Drehmassenzuschlagsfaktor berechnet sich über das reduzierte Trägheitsmoment der rotierenden Teile Θ_{red} , die Masse des Gesamtfahrzeugs und den dynamischen Reifenradius:

$$\lambda = 1 + \frac{\Theta_{red}}{r_{dyn}^2 m_{Fzg}} \quad (\text{Gl. 6.16})$$

Der dynamische Reifenradius r_{dyn} kann über den Abrollumfang U_{Reifen} , der bei einer Umdrehung und einer Geschwindigkeit von 60 km/h (nach DIN 70020) zurückgelegten Wegstrecke angegeben wird, berechnet werden [Hoe13, S. 263]:

$$r_{dyn} = \frac{U_{Reifen}}{2\pi} \quad (\text{Gl. 6.17})$$

Das reduzierte Trägheitsmoment der rotierenden Teile berechnet sich aus den Trägheitsmomenten der rotierenden Antriebsteile Θ_n und den jeweiligen Übersetzungen zwischen dem betrachteten rotierenden Teil und den Rädern, sowie aus den Trägheitsmomenten der Räder $\Theta_{Räder}$ [Hoe13, S. 42–43]:

$$\Theta_{red} = \left(\sum_1^k i_n^2 \Theta_n \right) + \Theta_{Räder} \quad (\text{Gl. 6.18})$$

Für den rotatorischen Trägheitsanteil der Reifen eines schweren Nutzfahrzeugs kann vereinfacht (Gl. 6.19) mit der Anzahl der Reifen N_{Reifen} angenommen werden, wobei Zwillingsbereifung mit zwei Rädern berücksichtigt werden [Hau12, S. 22].

$$\frac{\Theta_{Räder}}{r_{dyn}^2} = 56,7 N_{Reifen} \quad (\text{Gl. 6.19})$$

Befährt das Fahrzeug eine Steigung, muss der Steigungswiderstand überwunden werden, der aus dem Anteil der Gewichtskraft parallel zur Fahrbahn über den Steigungswinkel α berechnet wird [Hoe13, S. 44]:

$$F_{Steig} = m_{Fzg} g \sin \alpha \quad (\text{Gl. 6.20})$$

Der Rollwiderstand wird über den Rollwiderstandsbeiwert c_{RR} , der verhältnismäßig konstant über die Geschwindigkeit ist und den senkrecht auf die Fahrbahn wirkenden Anteil der Gewichtskraft des Fahrzeugs berechnet [Hoe13, S. 50]:

$$F_{Roll} = c_{RR} m_{Fzg} g \cos \alpha \quad (\text{Gl. 6.21})$$

Der Luftwiderstand F_{Luft} wird aus der Dichte der Luft ρ , dem Luftwiderstandsbeiwert c_w , der Stirnfläche des Fahrzeugs A_{St} und der relativen Fahrzeuggeschwindigkeit $v_{Fzg,rel}$, welche die Differenz der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Windgeschwindigkeit gegen Fahrtrichtung ist, berechnet [Hoe13, S. 54]:

$$F_{Luft} = \frac{1}{2} \rho_{Luft} c_w A_{St} v_{Fzg,rel}^2 \quad (\text{Gl. 6.22})$$

6.2.4 Ultracap-System

Der Lade- oder Entladestrom I_{UC} , den die Ultracaps, bereitstellen, berechnet sich aus der geforderten Leistung P_{UC} und der aktuellen Klemmspannung der Ultracaps U_{UC} [Bus11, S. 64]:

$$I_{UC} = \frac{P_{UC}}{U_{UC}} \quad (\text{Gl. 6.23})$$

Die Ultracaps werden über ein einfaches Ersatzschaltkreismodell modelliert (Abbildung 6.3). Dabei stellt die Kapazität den Energiespeicher dar und die Verluste werden über den Innenwiderstand modelliert [Böc08, S. 32]. Werden nur vergleichsweise langsame Vorgänge im Bereich einer Sekunde betrachtet, ist ein solch vereinfachtes Modell ausreichend [Spy00, S. 831]. Ansonsten müssten in das Ersatzschaltkreismodell zusätzlich ein oder mehrere RC-Gliedern seriell oder parallel zur dargestellten Schaltung hinzugefügt werden [Lin10, S. 50].

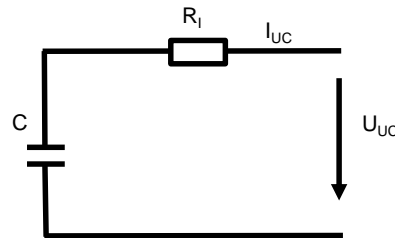


Abbildung 6.3: Ersatzschaltkreismodell der Ultracaps

Die Klemmspannung der Ultracaps U_{UC} wird entsprechend des Ersatzschaltkreismodells über den Innenwiderstand der Ultracaps $R_{i,UC}$, die aktuelle Kapazität C_{UC} und die Initialspannung $U_{UC,init}$ berechnet [Böc08, S. 31], [Gla08, S. 1690]:

$$U_{UC} = R_{i,UC} I_{UC} + \frac{1}{C_{UC}} \int_0^t I_{UC} dt + U_{UC,init} \quad (\text{Gl. 6.24})$$

Der Ladezustand des Ultracaps SOC_{UC} berechnet sich entsprechend der aktuellen Klemmspannung U_{UC} und der maximalen Spannung $U_{UC,max}$, die vorliegt, wenn die Ultracaps komplett geladen sind und der minimalen Spannung $U_{UC,min}$, die vorliegt, wenn die Ultracaps innerhalb der Betriebsgrenzen maximal entladen sind [Böc08, S. 32]:

$$SOC_{UC} = \frac{U_{UC} - U_{UC,min}}{U_{UC,max} - U_{UC,min}} \quad (\text{Gl. 6.25})$$

6.2.5 Lithium-Ionen Batterie

Das Batteriemodell besteht aus einem elektrischen Modell und einem Alterungsmodell (Abbildung 6.4). Der Lade- bzw. Entladestrom wird aus der Leistungsanforderung und der aktuellen Spannung berechnet (analog zu Gl. 6.23). Anschließend wird der Ladezustand analog zu vielen Arbeiten [Gru10, S. 47], [Bac05, S. 58], [Fad11, S. 3273], [Gra02, S. 79], [Her10, S. 57], [Lan07, S. 136], [Lar14, S. 19], [Sam13, S. 35] über die Integration des Klemmenstroms I_{Batt} über die Zeit, die Nennkapazität der Batterie C_{Batt} und den initialen Ladezustand $SOC_{Batt,0}$ berechnet:

$$SOC_{Batt} = SOC_{Batt,0} + \frac{1}{C_{Batt}} \int I_{Batt} dt \quad (\text{Gl. 6.26})$$

Anschließend wird über ein Ersatzschaltkreismodell die entstehende Klemmenspannung der Batterie über die Ruhespannung U_0 , den ohmschen Innenwiderstand $R_{i,Bat}$ und den Lade- oder Entladestrom I_{Bat} berechnet (Gl. 6.27). Sowohl die Ruhespannung als auch der Innenwiderstand sind ladezustandsabhängig über Kennfelder abgebildet [Her10, S. 56]. Eine Temperaturabhängigkeit wird nicht berücksichtigt, weil davon ausgegangen wird, dass die Batterie aufgrund der Klimatisierung bei einer möglichst konstanten Raumtemperatur betrieben wird.

$$U_{Batt} = U_{Batt,Ruhe} - R_{i,Batt} I_{Batt} \quad (\text{Gl. 6.27})$$

Die Berechnung über ein solch einfaches Ersatzschaltkreismodell wird üblicherweise in der Literatur verwendet [Bac05, S. 59], [Ebb12, S. 10], [Fad11, S. 3273], [Gra02, S. 78], weil der Parametrierungs- und Berechnungsaufwand gering ist. Es ist auch möglich, die Batterie über weitere RC-Glieder genauer zu modellieren, die das dynamische Verhalten der Batterie detaillierter beschreiben. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn kurze Zeitabschnitte betrachtet werden. Da die Simulationsschrittweite 1 s beträgt, ist das beschriebene Modell ausreichend.

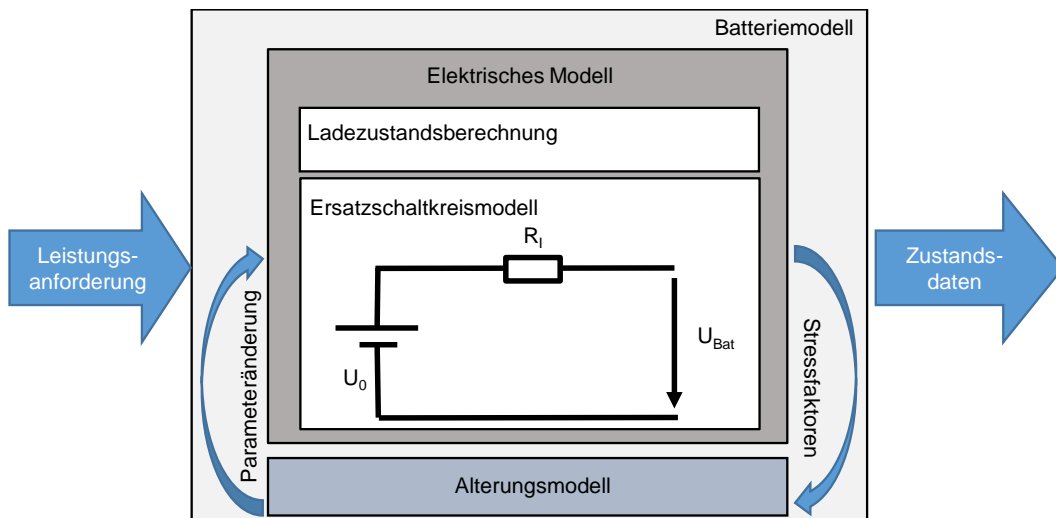


Abbildung 6.4: Batteriemodell mit einem elektrischen Modell und einem Alterungsmodell

Die Alterung der Batterie äußert sich vor allem durch die Abnahme der Kapazität und die Zunahme des Innenwiderstands [Bou11a, S. 1], [Hof10, S. 156]. Die Alterungseffekte werden vor allem durch die vier Stressfaktoren Strom, Temperatur, Ladezustand und Entladetiefe hervorgerufen [Mei15, S. 3], [Kra11, S. 29–30]. Durch das Alterungsmodell wird der Zusammenhang zwischen den Stressfaktoren und den Batterieparametern beschrieben. Im verwendeten Modell wird das einfache Alterungsmodell nach [Ebb12, S. 61] verwendet, das auch zur Berechnung der Kosten-Leistungs-Funktion der Batterie verwendet wird. Somit wird nur der Stressfaktor Energiedurchsatz $\int P_{Batt} dt$ berücksichtigt, der sich auf eine abnehmende Kapazität ΔC auswirkt (Gl. 6.28). Dabei wird davon ausgegangen, dass bei einer Abnahme von 20% der Anfangskapazität $C_{Batt,Beginn}$ das Lebensdauernende erreicht ist und die Anzahl an Lebenszyklen N_{zyklen} mit dem doppelten Energieinhalt der Batterie $E_{Batt,0}$ (Laden und Entladen) durchlaufen wurden.

$$\Delta C_{Batt} = \frac{\int P_{Batt} dt * 0,2 C_{Batt,0}}{2 N_{zyklen} E_{Batt,0}} \quad (\text{Gl. 6.28})$$

6.3 Parametrierung der Energiekomponentenmodelle

Die Energiekomponentenmodelle Traktion, Motor-Generator-Einheit, Ultracap, externes Netz und Nebenverbraucher werden so parametrierung, dass sie die realen Komponenten im ENUBA Lkw möglichst gut abbilden. Dies ist notwendig, um das entwickelte flexible Energiemanagement am simulierten Fahrzeug mit dem regelbasierten Energiemanagement im Realfahrzeug vergleichen zu können. Zudem wird der Batteriedatensatz der Batterie des Innotrucks verwendet.

6.3.1 Motor-Generator-Einheit

Damit die Motor-Generator-Einheit eine elektrische Leistung bereitstellen kann, wird dem Generator ein Moment und dem Verbrennungsmotor eine Drehzahl vorgegeben (Gl. 6.4). Daraus ergeben sich das Moment des Verbrennungsmotors und die Drehzahl des Generators, sowie ein Wirkungsgrad zwischen der mechanischen und der elektrischen Leistung, der von der Drehzahl und dem Moment des Generators abhängt. Die Momentenvorgabe für den Generator und die Drehzahlvorgabe für den Verbrennungsmotor entsprechend der geforderten elektrischen Leistung der Motor-Generator-Einheit, werden in der Simulation wie im ENUBA Lkw implementiert. Im ENUBA Lkw wurde bereits berücksichtigt, dass jeweils das Tupel aus Moment vom Generator und Drehzahl vom Verbrennungsmotor vorgegeben wird, bei dem der Gesamtwirkungsgrad für die jeweilige elektrische Leistungsanforderung von der Motor-Generator-Einheit am höchsten ist.

Die Übersetzung des Hochsetzgetriebes wurde über die Drehzahl des Verbrennungsmotors und des Generators zu 0,611 ermittelt. Der Wirkungsgrad zwischen Dieselmotor und Generator ist über das aufgezeichnete Moment von Dieselmotor und Generator mit 0,9 nachvollziehbar. Der durchschnittliche Wirkungsgrad des Umrichters im Auslegungszyklus des Herstellers wird mit 0,95 angenommen [Sie14].

Im Versuchsfahrzeug ist der Dieselmotor mit der Bezeichnung OM 501 LA von Daimler verbaut. Zu diesem wird ein Verbrauchskennfeld [Dai13] verwendet, das den spezifischen Kraftstoffverbrauch bei einer gegebenen Drehzahl und Leistung angibt. Für den Generator liegt ein Wirkungsgradkennfeld in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment [Sie14] vor.

Die Kraftstoffdichte für Dieselkraftstoff wird mit 832,5 g/l angenommen, weil dies der Mittelwert aus den zulässigen Dieseldichten nach [DIN14, S. 8] ist, der zwischen 820 und 845 g/l liegen muss.

In Tabelle 6.1 sind die Werte der Parameter der Motor-Generator-Einheit zusammengefasst, die neben dem Wirkungsgradkennfeld des Verbrennungsmotors und Generators verwendet werden.

Tabelle 6.1: Ermittelte Parameter zum Modell der Motor-Generator-Einheit des ENUBA Lkw

Parameter	Werte
i_G	0,611
η_G	0,9
$\eta_{Inverter}$	0,95
ρ_{Diesel}	832,5 g/l

6.3.2 Externes Netz und Nebenverbraucher

Zur Parametrierung des Energiebedarfs der Nebenverbraucher wird die verwendete elektrische Leistung während der Messfahrt aufgezeichnet und als zeitlicher Leistungsverlauf in der Simulation vorgegeben. Das Oberleitungsmodell kann bis zu 300 kW an das Fahrzeug abgeben. Dieser Wert entspricht mehr Leistung, als durch das Fahrzeug aufgenommen werden kann.

6.3.3 Traktion

Das Versuchsfahrzeug hat zwei Achsen. Die Vorderachse ist nicht angetrieben und die Hinterachse wird von einer zentralen Elektromaschine angetrieben (Abbildung 6.5).

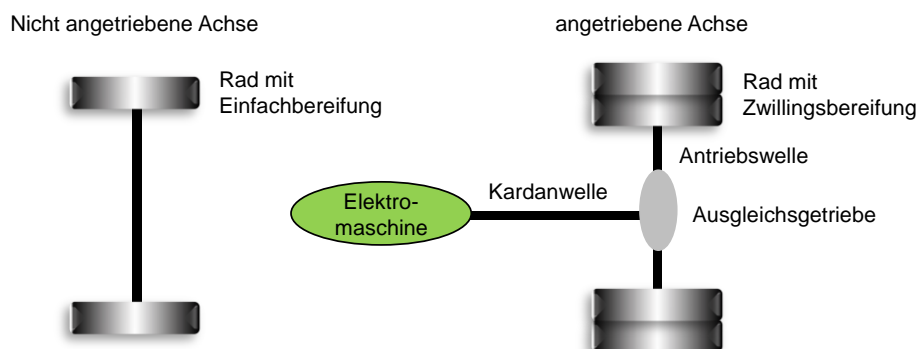


Abbildung 6.5: Schematischer Aufbau zur Traktion beim ENUBA Lkw

Bei der im ENUBA Lkw verbauten Elektromaschine handelt es sich um eine permanenterregte Synchronmaschine mit einer maximalen Leistung von 260 kW und einem max. Drehmoment von 4500 Nm. Für den Umrichter wird ein konstanter Wirkungsgrad von 95% entsprechend dem durchschnittlichen Wert im Auslegungszyklus des Herstellers angenommen [Sie14]. Die bereitgestellten Daten des Motors beinhalten Tabellen, die den Wirkungsgrad bei verschiedenen Drehzahlen und Drehmomenten für je eine definierte Spannung abbilden [Sie14]. Die Spannung im Zwischenkreis wird meist um 650 V gehalten, wie die Messungen der Fahrten auf öffentlichen Straßen ergeben haben. Daher wird diese Tabelle im Modell verwendet (Abbildung 6.6).

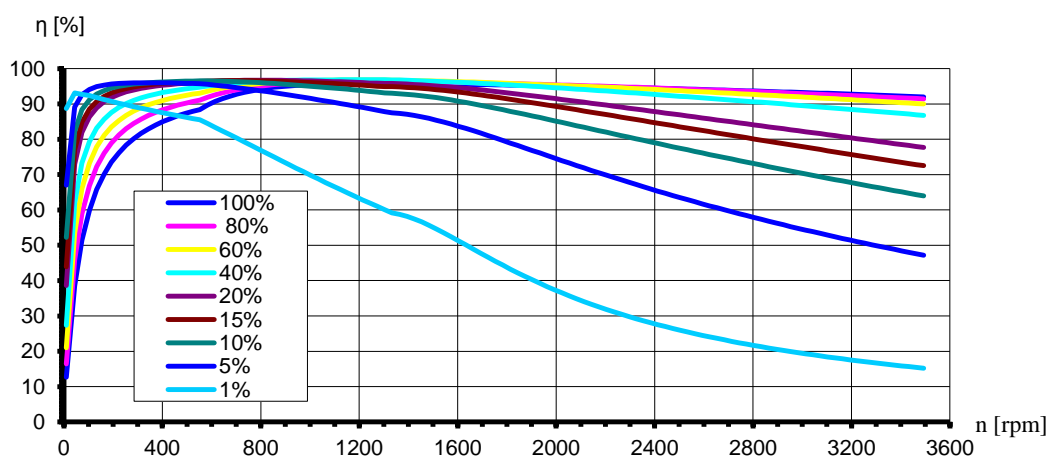


Abbildung 6.6: Wirkungsgrad des Traktionsmotors für verschiedene prozentuale Anteile an der maximalen mechanischen Leistung der Elektromaschine und bei verschiedenen Drehzahlen [Sie14]

Um das sich ergebende Moment der Elektromaschine direkt zu berechnen, wurden die bereitgestellten Daten zuvor so aufbereitet, dass ein Kennfeld aufgebaut wird, aus dem für die geforderte elektrische Leistung und die aktuelle Drehzahl direkt das Moment abgelesen werden kann. Die Berechnung dieses Kennfelds ist in [Mei14, S. 6–7] im Detail beschrieben.

Die Übersetzung zwischen der Elektromaschine und den Rädern konnte über eine Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit, der Drehzahl der Elektromaschine und über den Reifenradius mit $i_{Achse} = 6,824$ ermittelt werden. Für den Wirkungsgrad zwischen Elektromaschine und Rädern kann $\eta_{Achse} = 93,5\%$ angenommen werden [Dai14].

Um den Zusammenhang zwischen Bremspedalstellung und Bremskraft der mechanischen Scheibenbremsen (Abbildung 6.7) zu ermitteln, wurde die Bremspedalstellung über den Antriebs-CAN ermittelt und die Bremskraft der einzelnen Räder auf einem Bremsenprüfstand gemessen. Da die Leistung des Prüfstandes nicht ausreicht, um bei hohen Bremsdrücken die Bremskraft zu messen, wurde diese anhand von Bremsversuchen auf der Teststrecke ermittelt. Hierzu wurde die Verzögerung des Fahrzeugs bei konstant gehaltenen Bremspedalstellungen aufgezeichnet. Anschließend wurde unter Einbeziehung der anderen Fahrwiderstände die Bremskraft berechnet. Die Bremskraft nimmt ab ca. 50% der Bremspedalstellung nicht weiter zu und ein Maximum von 80 kN wird erreicht [Mei14, S. 7].

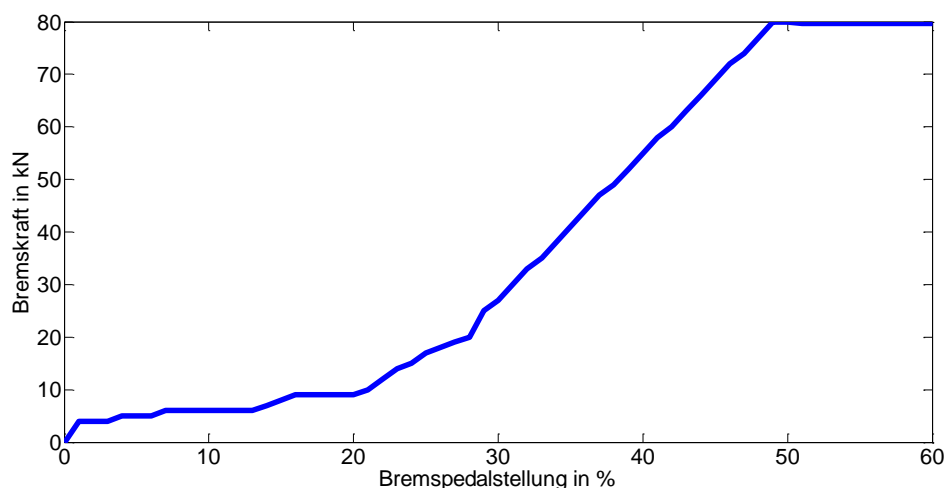


Abbildung 6.7: Zusammenhang Bremspedalstellung und Bremskraft

Um den Beschleunigungswiderstand über die Fahrzeugmasse, den dynamischen Reifenradius und das reduzierte Trägheitsmoment der rotierenden Teile zu berechnen (Gl. 6.15), (Gl. 6.16), wird die Fahrzeugmasse mit Hilfe einer Fahrzeugwaage zu 18000 kg ermittelt. Zudem wird ein dynamischer Reifenradius von 0,5 m über (Gl. 6.17) entsprechend des Abrollumfangs von 3090 mm bei den eingesetzten Reifen mit der Bezeichnung 315/70 R22.5 von Continental [Con13, S. 30] berechnet. Für die Berechnung des reduzierten Trägheitsmoments wird wie in [Mei14, S. 7–8] beschrieben, das Trägheitsmoment der Kardanwelle, des Differenzials und der Antriebswellen nach [Hau12, S. 22] vernachlässigt, so dass sich (Gl. 6.29) mit (Gl. 6.18) ergibt.

$$\theta_{red} = i_{Achse}^2 \theta_{em} + (56,7 N_{Reifen} r_{dyn}^2) \quad (\text{Gl. 6.29})$$

Mit sechs Reifen, dem Trägheitsmoment der Elektromaschine von $2,4 \text{ kgm}^2$ [Sie13], der Fahrzeugmasse und der konstanten Übersetzung i_{Achse} ergibt sich der Drehmassenzuschlagsfaktor für das Fahrzeug insgesamt zu $\lambda=1,04$.

Um die Roll- und Luftwiderstandsparameter zu ermitteln, wird das Vorgehen von der TU Graz mit Konstantfahrtversuchen für konventionelle Lkw [Hau12, S. 16] auf den seriell hybriden ENUBA Lkw übertragen. Hierbei können die Parameter für beide Fahrwiderstände ohne aufwändige Messeinrichtungen, wie bspw. ein Windkanal, ermittelt werden. Wie bei [Mei14, S. 8] beschrieben, wird das Moment an der Elektromaschine ausgelesen, die Fahrzeuggeschwindigkeit über eine Kreiselplattform, die Fahrzeugposition per GPS und die Windgeschwindigkeit per Ultraschall bei Konstantfahrten auf einer ausreichend langen möglichst ebenen Teststrecke gemessen. Bei den Geschwindigkeiten 90 km/h, 65 km/h, 40 km/h und 15 km/h werden die mindestens 20 Sekunden langen Messungen mit mindestens 20 Datensätzen durchgeführt. Alle Konstantfahrtversuche wurden auf dem Testgelände der Driving Center Groß Dölln GmbH durchgeführt. Pro Geschwindigkeit wurden 10 Messfahrten in jeweils abwechselnden Fahrtrichtungen aufgenommen. Zudem wurden alle Messungen jeweils mit und ohne den Stromabnehmer an der Oberleitung durchgeführt, um den Effekt dieses Systems auf den Fahrwiderstand zu berücksichtigen.

Über das gemessene Moment der Elektromaschine, den dynamischen Reifenradius, der Übersetzung und den Wirkungsgrad zwischen Elektromaschine und Rad, wird die Antriebskraft am Rad berechnet (Gl. 6.9), (Gl. 6,11). Zudem wurde der Höhenverlauf der Strecke mit den jeweils zugehörigen GPS-Daten zuvor vermessen. Anhand der aufgezeichneten GPS-Position im Fahrzeug und den zugehörigen Höhendaten wird der Steigungswiderstand zu jedem Messzeitpunkt ermittelt (Gl. 6.20). Wird von der Antriebskraft die Steigungskraft abgezogen, ergibt dies bei konstanter Geschwindigkeit die Summe aus dem Roll- und Luftwiderstand (Gl. 6.14). Mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate wird anhand der Punkte, die die Mittelwerte einer Messfahrt darstellen, eine Funktion (Gl. 6.30) angenähert (Abbildung 6.8).

$$F_{Antrieb} - F_{Steig} = x_1 v_{Fzg,rel}^2 + x_2 \quad (\text{Gl. 6.30})$$

Der Luftwiderstand ist von dem Quadrat der Relativgeschwindigkeit abhängig und der Rollwiderstand in guter Annäherung geschwindigkeitsunabhängig. Wird x_2 dem Rollwiderstand gleichgesetzt, bestimmt sich der Rollwiderstandsbeiwert zu 0,008 für den ENUBA Lkw sowohl mit als auch ohne ausgefahrenen Stromabnehmer. Mit x_1 wird der Luftwiderstand dividiert durch das Quadrat der Relativgeschwindigkeit abgebildet. Die Dichte der Luft wird mit $1,269 \text{ kg/m}^3$ parametrisiert, weil dieser Wert bei den Messfahrten, die bei ca. 5°C Außentemperatur durchgeführt wurden, gemessen wurde. Die Stirnfläche des Fahrzeugs wird mit dem Programm MB-Ruler zu $9,25 \text{ m}^2$ ohne Stromabnehmer und $9,83 \text{ m}^2$ mit Stromabnehmer bestimmt. Daraus ergibt sich der Luftwiderstandsbeiwert zu 0,66 ohne Kontakt zur Oberleitung und zu 0,82 mit Kontakt zur Oberleitung.

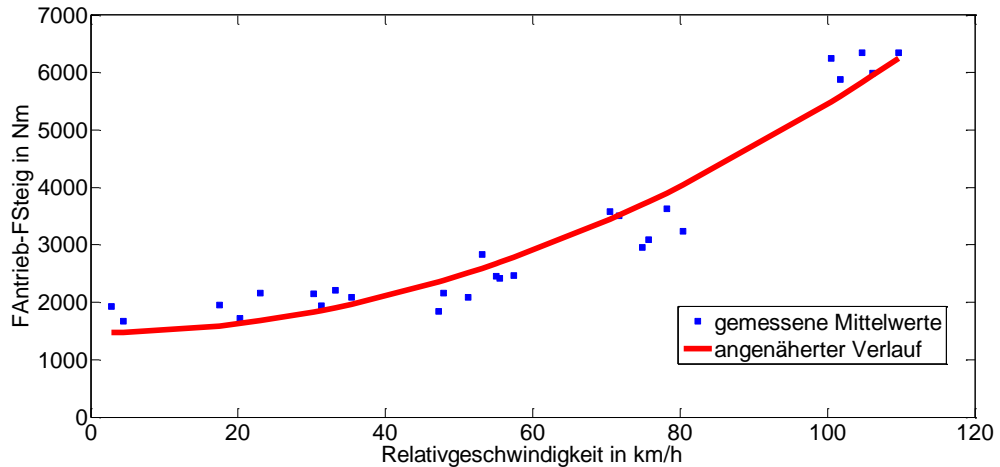


Abbildung 6.8: Luft- und Rollwiderstand des ENUBA Lkw mit Stromabnehmer an der Oberleitung in Abhängigkeit der relativen Geschwindigkeit zwischen Fahrzeug (über eine Kreisplattform gemessen) und Wind (in Fahrtrichtung anteilige Windgeschwindigkeit)

Alle Parameter, außer dem Wirkungsgradkennfeld der Elektromaschine und der Kennlinie zur Bremskraft, sind in Tabelle 6.2 mit den entsprechenden Werten für das Traktionsmodell zusammengefasst.

Tabelle 6.2: Ermittelte Parameter zum Traktionsmodell des ENUBA Lkw

Parameter	Werte
$P_{EM,max}$	260 kW
$M_{EM,max}$	4500 Nm
$\eta_{Inverter}$	0,95
i_{Achse}	6,824
η_{Achse}	0,935
r_{dyn}	0,5 m
m_{fzg}	18000 kg
λ	1,04
c_{RR}	0,008
ρ_{luft}	1,269 kg/m ³
$c_{w,ohne SA}$	0,66
$c_{w,mit SA}$	0,82
$A_{St,ohne SA}$	9,25 m ²
$A_{St,mit SA}$	9,83 m ²

6.3.4 Ultracap

Mit einem Innenwiderstand von 18 mΩ pro Modul [Max13] und sechs Modulen in Reihe, ergibt sich ein Gesamtinnenwiderstand von 108 mΩ. Die Gesamtkapazität berechnet sich aus dem Quotienten der Nennkapazität von 63 F pro Modul [Max13] und der Anzahl der in Reihe geschalteten Module zu 10,5 F. Um den Ladezustand zu berechnen, wird der Wert

710 V für die maximale Spannung des Ultracapsystems und die minimale Spannung von 300 V verwendet. Diese Werte wurden aufgrund des aufgezeichneten Ladezustands und der gemessenen Spannung ermittelt. Die Parameter des Ultracapsystems, das im ENUBA Lkw verbaut ist, sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

Tabelle 6.3: Ermittelte Parameter zum Ultracapmodell des ENUBA Lkw

Parameter	Werte
$R_{i,UC}$	108 m Ω
C_{UC}	10,5 F
$U_{UC,min}$	710 V
$U_{UC,max}$	300 V

6.3.5 Lithium-Ionen Batterie

Die Nennkapazität der im Innotruck verbauten Batterie beträgt 159 Ah bei einer Nennspannung von 666 V [Aka13] und somit einem Energieinhalt von 106 kWh. Zudem wurden die vom Hersteller zur Verfügung gestellten gemessenen Daten zum Innenwiderstand der Batterie verwendet. Dieser ist in Abhängigkeit vom Ladezustand und ob geladen oder entladen dargestellt (Abbildung 6.9). Neben dem Innenwiderstand der Zellen ist ein Innenwiderstand von 14,2 m Ω für Sicherungen, Schütze, Stecker, Kabel, Kontakte mit einberechnet [Aka13].

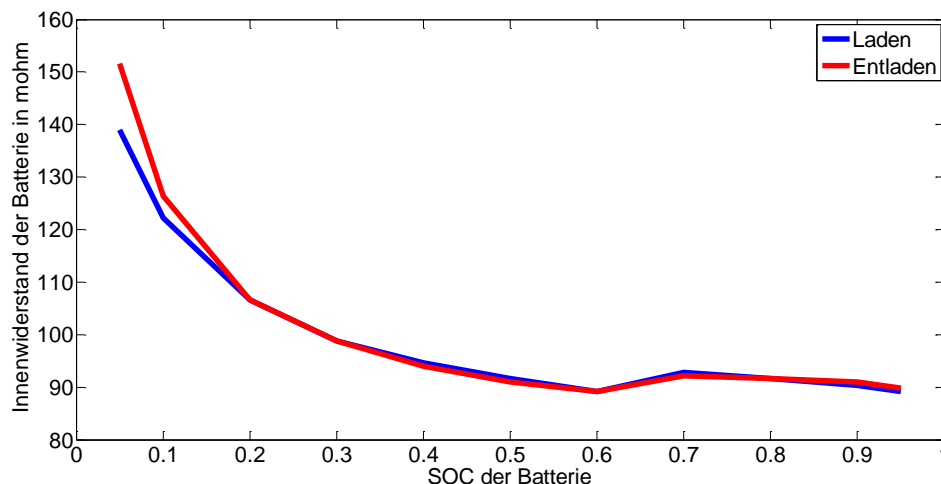


Abbildung 6.9: Innenwiderstand des Batteriepacks beim Laden und Entladen in Abhängigkeit des Ladezustands bei 25°C [Aka13]

Zudem wurde die Ruhespannungskennlinie [Aka13], die vom Hersteller vermessen wurde, im Simulationsmodell verwendet (Abbildung 6.10). Sie beschreibt die Ruhespannung der Batterie in Abhängigkeit vom Ladezustand.

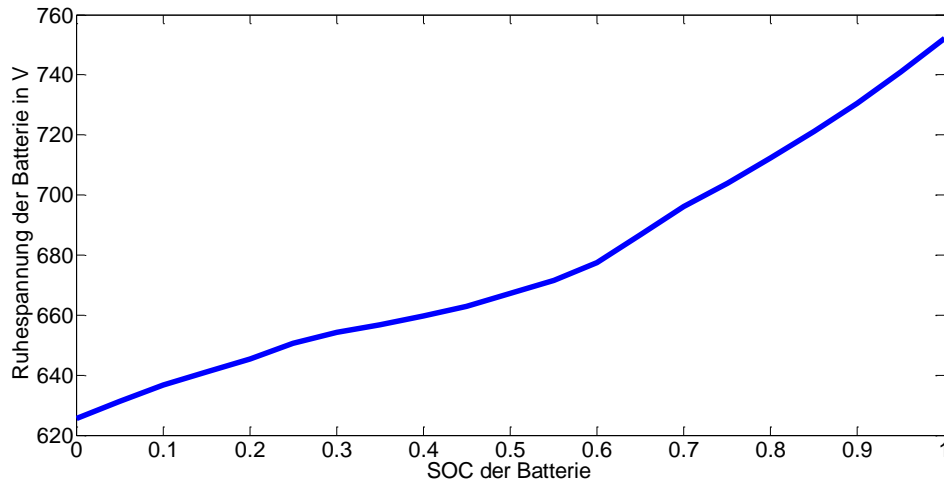


Abbildung 6.10: Ruhspannungskennlinie des Batteriepacks in Abhängigkeit des Ladezustands bei 25°C [Aka13]

6.4 Verifizierung der Energiekomponentenmodelle des Referenzfahrzeugs

Zur Verifizierung der Komponentenmodelle, die im ENUBA Lkw verwendet werden, wird eine mehrstündige Messfahrt auf öffentlichen Straßen in und um Berlin verwendet (Anhang B). Die Messfahrt beginnt an der Teststrecke in Groß-Dölln und endet wieder dort. Dazwischen werden möglichst verschiedene Straßentypen, wie Stadtstraßen, Landstraßen und eine Autobahn befahren.

6.4.1 Verifikation des Modells der Motor-Generator-Einheit

Um das Modell der Motor-Generator-Einheit zu verifizieren, wurde während der beschriebenen Messfahrt die von der Einheit aufgenommene elektrische Leistung durch das Messen der Spannung und des Stroms aufgezeichnet, sowie der Kraftstoffverbrauch über ein Durchflussmessgerät gemessen. Wird vom Simulationsmodell dieselbe elektrische Leistung gefordert wie im Realfahrzeug während der Fahrt, ergibt sich ein sehr ähnlicher kumulierter Kraftstoffverbrauch (Abbildung 6.11).

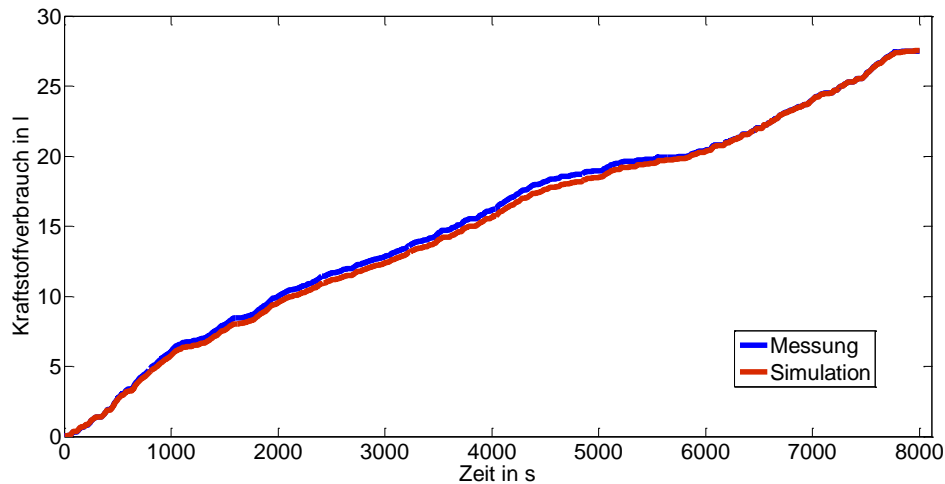


Abbildung 6.11: Kraftstoffverbrauch der Motor-Generator-Einheit in der Messung und der Simulation bei gleichen Leistungsanforderungen für die Messfahrt Berlin

6.4.2 Verifikation des Traktionsmodells

Zur Verifikation des Traktionsmodells werden die aufgenommene Leistung, die Bremspedalstellung, der Höhenverlauf über GPS und die Fahrzeuggeschwindigkeit aufgezeichnet. Im Anschluss werden dem Traktionsmodell in der Simulation die aufgezeichnete elektrische Leistung und zudem dieselbe Bremspedalstellung, die sich auf die mechanische Bremse auswirkt, sowie der berechnete Steigungsverlauf vorgegeben. In der Simulation wird eine Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet. Diese wird mit der gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeit verglichen, die einigermaßen übereinstimmen (Abbildung 6.12). Allerdings wurde die Windgeschwindigkeit entlang der Strecke nicht gemessen. Daher wird der Luftwiderstand in der Simulation nur über die Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet, statt über die Differenz aus Fahrzeuggeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit gegen die Fahrtrichtung. Da die Geschwindigkeit quadratisch in den Luftwiderstand eingeht, ist die Abweichung der Simulation von der Messung bei höheren Geschwindigkeiten größer. Zudem wurde der Höhenverlauf über GPS aufgezeichnet. Daher ist der Steigungsverlauf nicht genau genug, um daraus sinnvolle Steigungswerte für die Simulation mit einzubeziehen. Die Übereinstimmung zwischen der Messung und der Simulation ist dadurch vor allem auf ebener Strecke gegeben. Eine dritte Abweichung ergibt sich durch verschiedene Straßenoberflächenbeschaffenheiten, die in der Simulation bei den Bremsvorgängen nicht mit einbezogen werden. Infolgedessen kommt es auch zu Abweichungen bei geringen Geschwindigkeiten bei Bremsvorgängen, wie bei ca. 320s, 420s und 600s zu sehen ist (Abbildung 6.12).

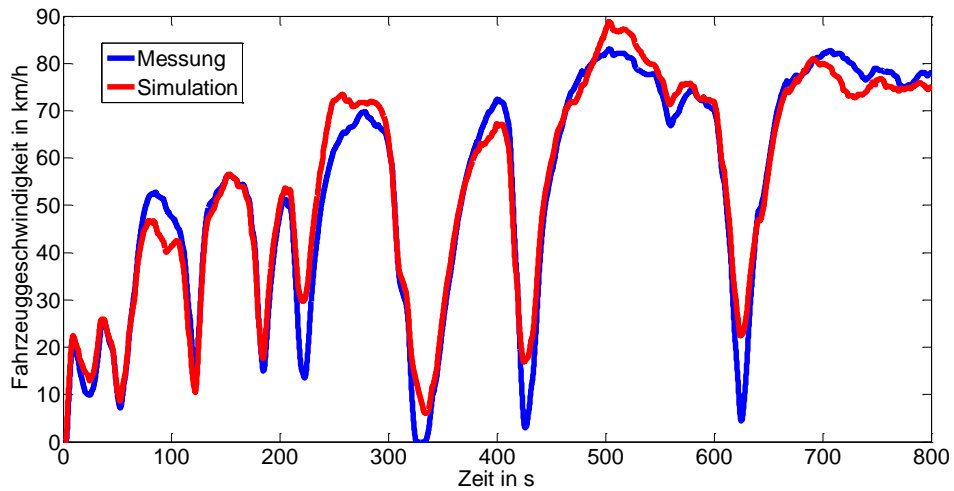


Abbildung 6.12: Fahrzeuggeschwindigkeit durch das Traktionssystem in der Messung und der Simulation bei gleichen Eingangsdaten für die Messfahrt Berlin

6.4.3 Verifikation des Ultracapmodells

Auch das Ultracapmodell wird durch den Vergleich von simulierten und gemessenen Ergebnissen verifiziert. Hierzu wird während der Fahrt die elektrische Leistung gemessen, die durch das Ultracapsystem aufgenommen bzw. abgegeben wird. Wird dieselbe Leistung in der Simulation gefordert, ergibt sich ein sehr ähnlicher Ladezustand wie derjenige, der während der Fahrt gemessen wurde (Abbildung 6.13).

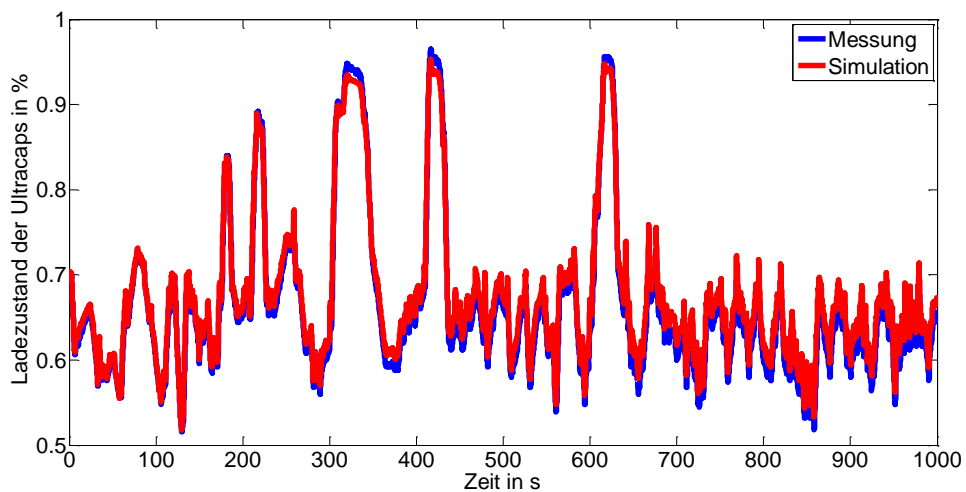


Abbildung 6.13: Ladezustand des Ultracapsystems in der Messung und der Simulation bei gleichen Leistungsanforderungen für die Messfahrt Berlin

7 Ergebnisse zur Leistungsverteilung und den Betriebskosten beim flexiblen Energiemanagement

Anhand der Simulationsergebnisse des flexiblen Energiemanagements und der Messergebnisse des regelbasierten Energiemanagements werden die beiden Verfahren verglichen. Zudem werden die Auswirkungen gezeigt, wenn das flexible Energiemanagement bei verschiedenen Fahrzeugvarianten für dieselbe Fahrt eingesetzt wird.

7.1 Vergleich der Leistungsverteilung und der Betriebskosten vom flexiblen Energiemanagement und regelbasierten Energiemanagement beim ENUBA Lkw

Um das flexible Energiemanagement dem im ENUBA Lkw implementierten regelbasierten Energiemanagement gegenüberzustellen, wird dieselbe Messfahrt (Anhang B) abgefahren. Damit die entstehenden Betriebskosten beider Energiemanagementverfahren miteinander verglichen werden können, werden die auf der Messfahrt geforderten Fahrereingaben und Umweltbedingungen dem flexiblen Energiemanagement in der Simulation ebenfalls vorgegeben. Durch die gleichen Fahrereingaben und die übernommene Fahrsteuerung werden dieselben Antriebs- und Bremsleistungen von der Traktion gefordert. Zudem werden gleiche geforderte Nebenverbraucherleistungen angenommen. Somit wird nicht der Einfluss des Fahrermodells auf die Betriebskosten untersucht, sondern der Einfluss durch die von beiden Verfahren jeweils geforderte Leistungsverteilung auf die entstehenden Betriebskosten.

Die Summe der Leistungen aller Quellen und Senken beträgt bei beiden Verfahren zu jedem Zeitpunkt Null, so dass insgesamt eine ausgeglichene Energiebilanz vorliegt. Zudem sind die Leistungsvorgaben für die Nebenverbraucher und die Traktion beim flexiblen Energiemanagement und dem regelbasierten Energiemanagement über die gesamte Messfahrt identisch (Abbildung 7.1, Abbildung 7.2, Anhang C). Die gleiche Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher und der Traktion sind beim flexiblen Energiemanagement auf die Priorisierung der Senken in der Prioritätsklasse 1 zurückzuführen. Zudem wird die rekuperierte Leistung der Traktion zuerst von den Kosten-Leistungs-Funktionen der Senken abgezogen (Kapitel 5.2.2.3). Folglich wird die durch die Fahrsteuerung berechnete maximale Rekuperationsleistung, unter Berücksichtigung des Fahrkomforts, von den Senken aufgenommen.

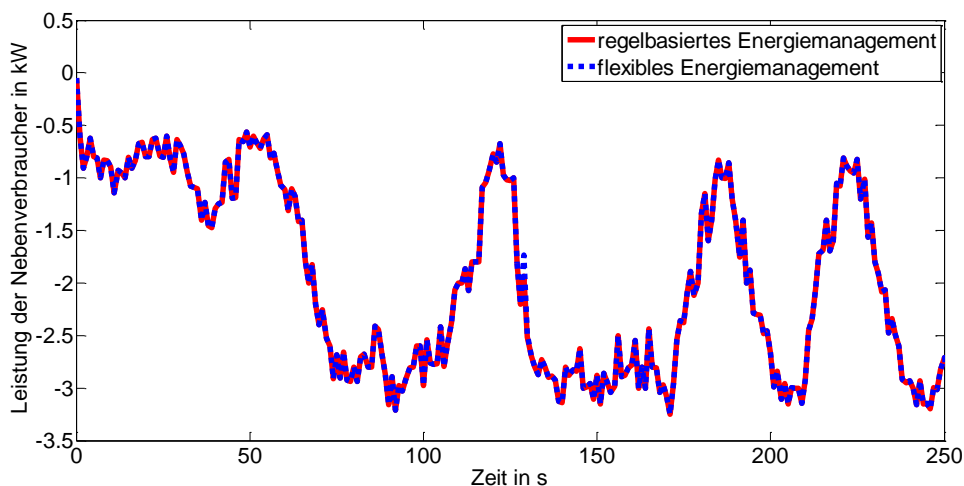


Abbildung 7.1: Leistungsverlauf der Nebenverbraucher beim regelbasierten Energiemanagement im Realfahrzeug und beim flexiblen Energiemanagement in der Simulation für die ersten 250 s der Messfahrt

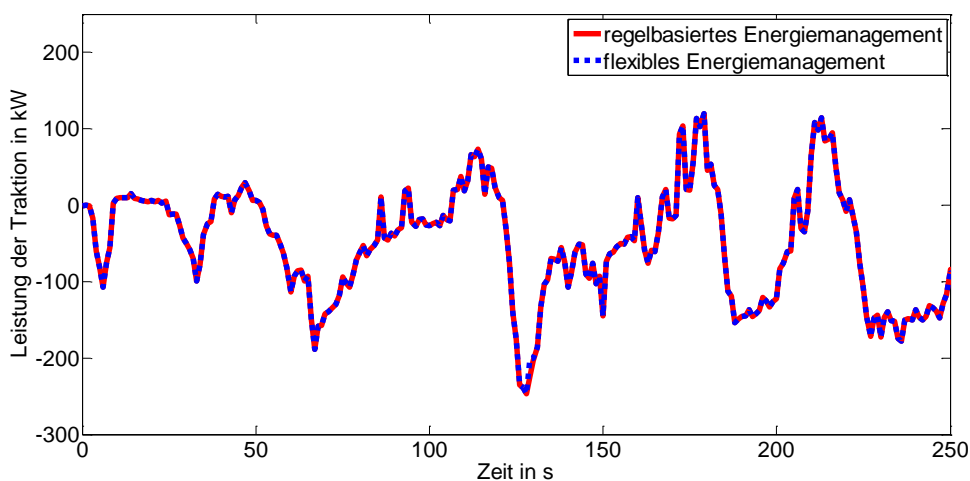


Abbildung 7.2: Leistungsverlauf der Traktion beim regelbasierten Energiemanagement im Realfahrzeug und beim flexiblen Energiemanagement in der Simulation für die ersten 250 s der Messfahrt

Insgesamt ist der Verlauf der geforderten Leistung von der Motor-Generator-Einheit ähnlich beim regelbasierten und flexiblen Energiemanagement. Jedoch flattern die Werte der Motor-Generator-Einheit beim flexiblen Energiemanagement (Abbildung 7.3, Anhang C). Das liegt daran, dass die Leistung der Einheit immer kurzzeitig nicht benötigt wird, nämlich dann, wenn die Ultracaps Leistung bereitstellen können. Ist der Ladezustand der Ultracaps jedoch an der unteren Ladezustandsgrenze angekommen, wirken diese nicht mehr als Quelle, sondern als Senke und die Leistung wird wieder von der Motor-Generator-Einheit bereitgestellt und lädt dabei ggf. sogar zusätzlich die Ultracaps.

Ergebnisse zur Leistungsverteilung und den Betriebskosten beim flexiblen Energiemanagement

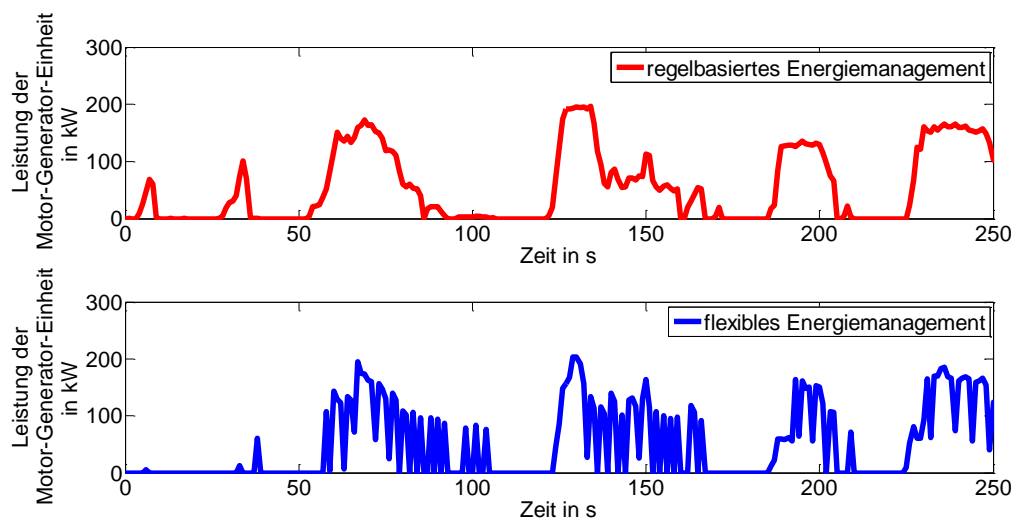


Abbildung 7.3: Leistungsverlauf der Motor-Generator-Einheit beim regelbasierten und flexiblen Energiemanagement für die ersten 500 s der Messfahrt

Für die gesamte Messfahrt ist der Mittelwert der geforderten Leistung beim flexiblen Energiemanagement von der Motor-Generator-Einheit geringer und die Standardabweichung höher als beim regelbasierten Energiemanagement (Tabelle 7.1).

Tabelle 7.1: Mittelwert und Standardabweichung der Leistungsforderung von der Motor-Generator-Einheit entsprechend der unterschiedlichen Energiemanagementverfahren

	regelbasiertes Energiemanagement	flexibles Energiemanagement
Mittelwert der Leistung der Motor-Generator-Einheit in kW	42,51	40,77
Standardabweichung der Leistung der Motor-Generator-Einheit in kW	51,93	58,96

Der Verlauf der geforderten Leistung der Ultracaps ist beim regelbasierten und flexiblen Energiemanagement deutlich unterschiedlicher im Vergleich zur Motor-Generator-Einheit (Abbildung 7.4, Anhang C). Auch hier fällt auf, dass die Leistungsvorgaben beim flexiblen Energiemanagement deutlich flattern.

Ergebnisse zur Leistungsverteilung und den Betriebskosten beim flexiblen Energiemanagement

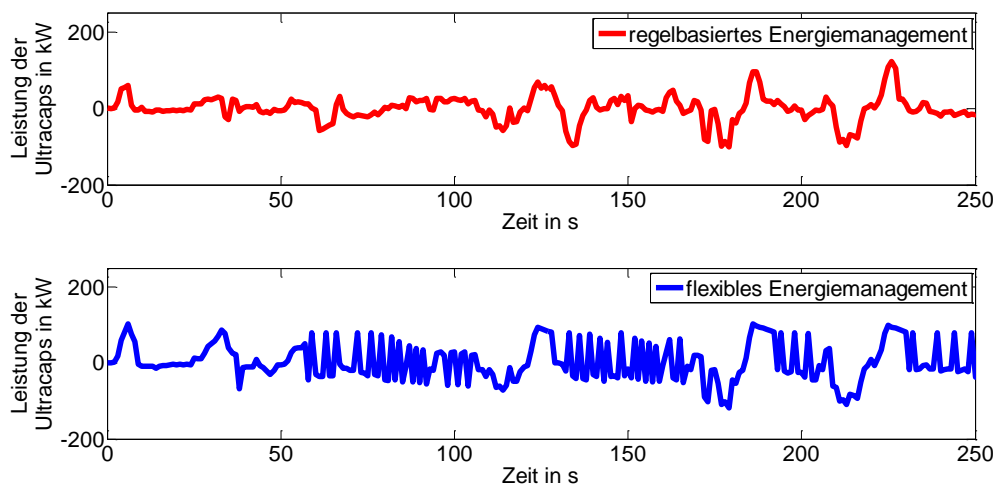


Abbildung 7.4: Leistungsverlauf der Ultracaps beim regelbasierten und flexiblen Energiemanagement in den ersten 250s der Messfahrt

Vor allem der Mittelwert ist für die geforderte Leistung zum Laden und zum Entladen der Ultracaps beim flexiblen Energiemanagement höher als beim regelbasierten Energiemanagement (Tabelle 7.2).

Tabelle 7.2: Mittelwert und Standardabweichung der Leistungsforderung von den Ultracaps entsprechend der unterschiedlichen Energiemanagementverfahren in kW

	regelbasiertes Energiemanagement	flexibles Energiemanagement
Mittelwert der Leistung der Ultracaps als Quelle in kW	19,64	36,56
Mittelwert der Leistung der Ultracaps als Senke in kW	-25,57	-35,65
Standardabweichung der Leistung der Ultracaps als Quelle in kW	21,52	31,26
Standardabweichung der Leistung der Ultracaps als Senke in kW	31,16	21,91

Der sich beim regelbasierten Energiemanagements ergebende Ladezustand der Ultracaps schwankt um ca. 60-65%, dagegen pendelt sich der Ladezustand beim flexiblen Energiemanagement um 30-35% ein (Abbildung 7.5). Beim flexiblen Energiemanagement wird dieser Wert durch den ladezustandsabhängigen Gewichtungsfaktor erreicht, der bei der Wahl der Speicher als Quelle oder Senke berücksichtigt wird (Kapitel 5.2.4).

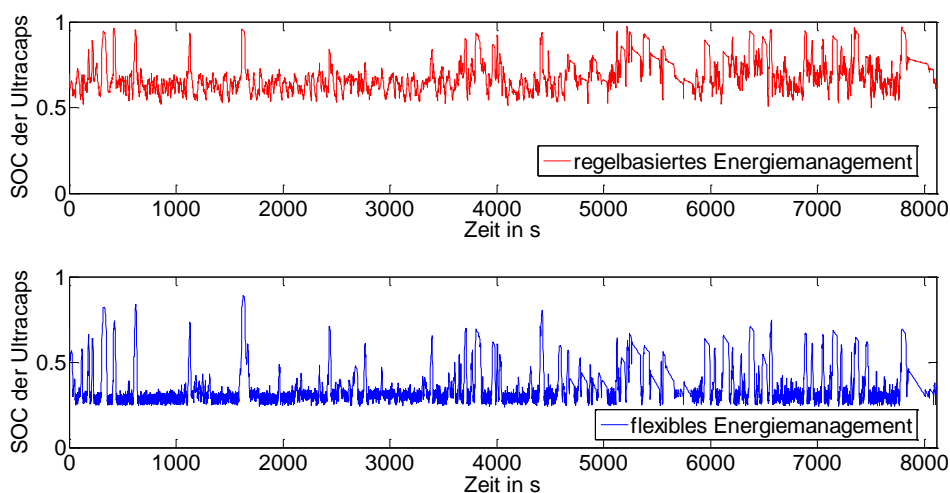


Abbildung 7.5: Ladezustandsverlauf der Ultracaps beim regelbasierten und flexiblen Energiemanagement während der gesamten Messfahrt

Beim flexiblen Energiemanagement wird nur der Bremswiderstand als niedrig priorisierte Senke verwendet. Beim regelbasierten Energiemanagement wird neben dem Bremswiderstand auch die Motorbremse der Motor-Generator-Einheit genutzt, um überschüssige Energie in Wärme zu wandeln. Diese überschüssige Energie tritt vor allem bei der Rekuperation auf, wenn die Nebenverbraucher bereits versorgt werden und der Speicher nicht weiter geladen werden kann. Insgesamt wird durch das flexible Energiemanagement weniger Energie durch den Bremswiderstand aufgenommen, als bei dem regelbasierten Energiemanagement durch Bremswiderstand und Motorbremse (Tabelle 7.3, Anhang C).

Tabelle 7.3: Mittelwert und Standardabweichung der Leistungsforderung vom Bremswiderstand und der Motorbremse entsprechend der unterschiedlichen Energiemanagementverfahren

	regelbasiertes Energiemanagement	flexibles Energiemanagement
Mittelwert der Leistung des Bremswiderstands und der Motorbremse in kW	-2,68	-0,29
Standardabweichung der Leistung des Bremswiderstands und der Motorbremse in kW	5,76	3,48

Auf Basis der gemessenen Zustandsdaten des regelbasierten Energiemanagements und der simulierten Zustandsdaten des flexiblen Energiemanagements werden die entstehenden Betriebskosten für jede einzelne Quelle berechnet und anschließend addiert. Die Berechnung erfolgt für beide Energiemanagementverfahren auf dieselbe Weise. Insbesondere bei der Berechnung von Kosten für den Verschleiß ist die Berechnung der Betriebskosten entsprechend der Leistungsverteilung bereits genauer als die Messmöglichkeiten in der Realität.

Die Betriebskosten der Motor-Generator-Einheit werden über den Kraftstoffverbrauch, den Dieselpreis und die Wartungskosten berechnet. Der kumulierte Verlauf der entstehenden Betriebskosten beider Energiemanagementverfahren zeigt, dass das flexible Energiemanagement etwas geringere Betriebskosten während der Messfahrt verursacht (Abbildung 7.5). Dies ist direkt mit dem geringeren Mittelwert der Leistungsbereitstellung durch die

Motor-Generator-Einheit und dem damit verbundenen geringeren Kraftstoffverbrauch beim flexiblen Energiemanagement verbunden.

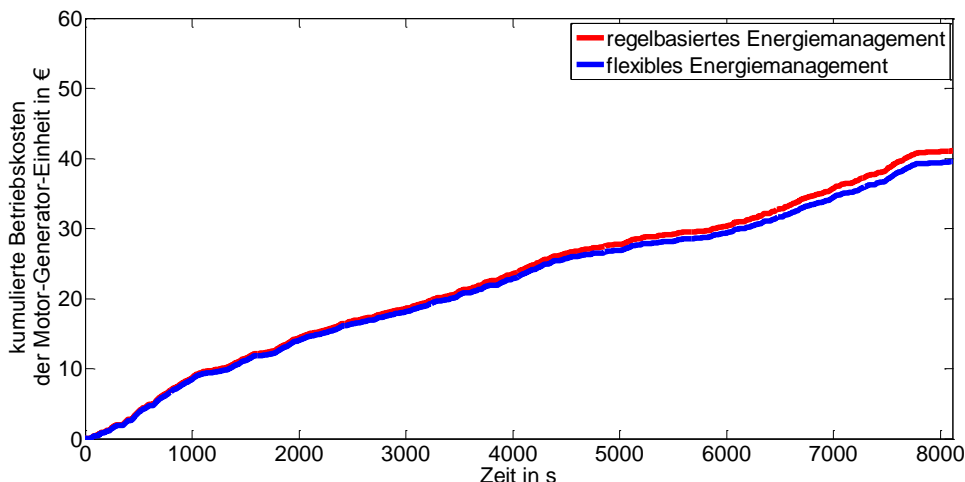


Abbildung 7.6: Vergleich der kumulierten Kosten der Energiemanagementverfahren von der Motor-Generator-Einheit während der gesamten Messfahrt

Die Betriebskosten der Ultracaps werden nur durch die Alterung berechnet, nicht jedoch wie bei der Berechnung der Kosten-Leistungs-Funktion über die Ladekosten. Dies ist nötig, weil die Ladekosten sonst doppelt gerechnet würden. Werden bspw. die Ultracaps über die Motor-Generator-Einheit geladen, werden hier bereits die entstehenden Betriebskosten berechnet. Die Alterung der Ultracaps wird über den Leistungsdurchsatz beim Entladen und Laden berechnet. Dennoch fallen die kumulierten Betriebskosten der Ultracaps gering aus, verglichen mit den Kosten der Motor-Generator-Einheit (Abbildung 7.7). Die Betriebskosten für die Ultracaps sind beim flexiblen Energiemanagementverfahren etwas höher, weil der Mittelwert der Leistung für das Laden und Entladen der Ultracaps höher ist (Tabelle 7.2).

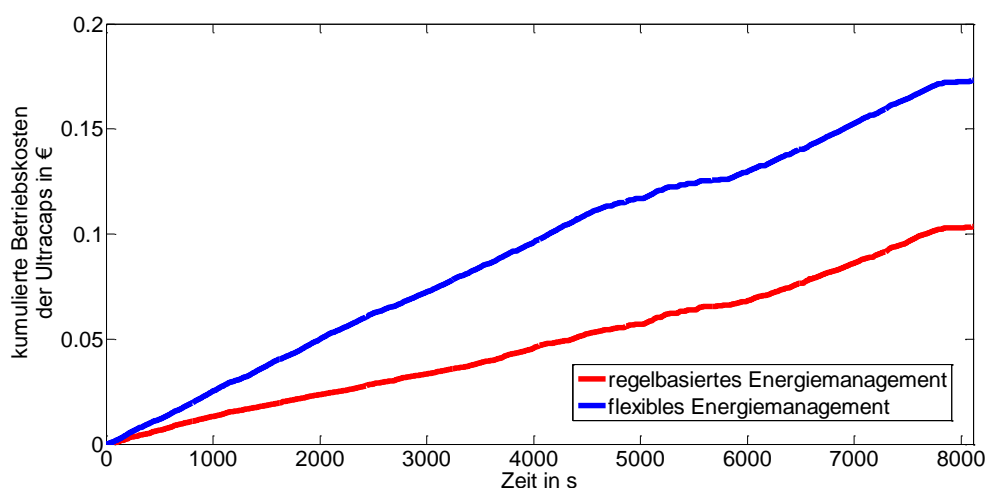


Abbildung 7.7: Vergleich der kumulierten Kosten der Energiemanagementverfahren von den Ultracaps während der gesamten Messfahrt

Zusätzlich zur Motor-Generator-Einheit und den Ultracaps wirkt nur die Traktion im Falle der Rekuperation als Quelle. Hierbei fallen allerdings keine weiteren Betriebskosten an. Dadurch ergeben sich die Gesamtbetriebskosten nur aus den Betriebskosten der

Ultracaps und der Motor-Generator-Einheit. Da zum Ende der Fahrt der Ladezustand der Ultracaps sowohl beim regelbasierten als auch beim flexiblen Energiemanagement nicht gleich dem Ausgangsladezustand ist, wird über Ausgleichskosten berechnet, welche Kosten entstehen würden, um den Ausgangszustand wiederherzustellen. Dazu wird die nötige Energie berechnet, um den Ladezustand anzupassen. Diese wird mit dem Strompreis des externen Netzes multipliziert. Zusätzlich werden erneut Alterungskosten für den dazu notwendigen Energiedurchsatz berechnet. Tabelle 7.4 fasst die entstehenden Betriebskosten für beide Energiemanagementverfahren zusammen.

Tabelle 7.4: Betriebskosten der Messfahrt beim flexiblen und regelbasierten Energiemanagement

	regelbasiertes Energiemanagement	flexibles Energiemanagement
Betriebskosten der Motor-Generator-Einheit in €	41,09	39,55
Betriebskosten der Ultracaps in €	0,10	0,17
Ausgleichskosten, um den Ausgangsladezustand zu erreichen in €	0,08	0,40
Gesamtbetriebskosten in €	41,27	40,12

7.2 Leistungsverteilung und Betriebskosten beim flexiblen Energiemanagement bei einer Fahrzeugvariante mit Batterie

Zum Vergleich der Auswirkungen des flexiblen Energiemanagement beim ENUBA Lkw mit denen beim Innotruck wird statt den Ultracaps die Batterie in die Berechnung einbezogen. Wenn dieselben Fahrereingaben und Umweltbedingungen der Messfahrt vorgegeben werden, wird auch weiterhin dieselbe Leistung für die Traktion und die Nebenverbraucher bereitgestellt (Anhang D). Zudem herrscht auch während der Messfahrt beim Innotruck immer eine ausgeglichene Energiebilanz zwischen den Energiekomponenten. Der Leistungsverlauf der Motor-Generator-Einheit und der Batterie zeigt, dass, sobald ein Speicher mit einer größeren Kapazität vorhanden ist, die Motor-Generator-Einheit deutlich weniger genutzt wird (Abbildung 7.8 und 7.9). Stattdessen wird zuerst die Batterie als Quelle deutlich mehr genutzt. Ist aber auch hier der untere Ladezustand erreicht (ca. ab 4000 s), wird die Motor-Generator-Einheit wieder wie beim flexiblen Energiemanagement mit den Ultracaps genutzt.

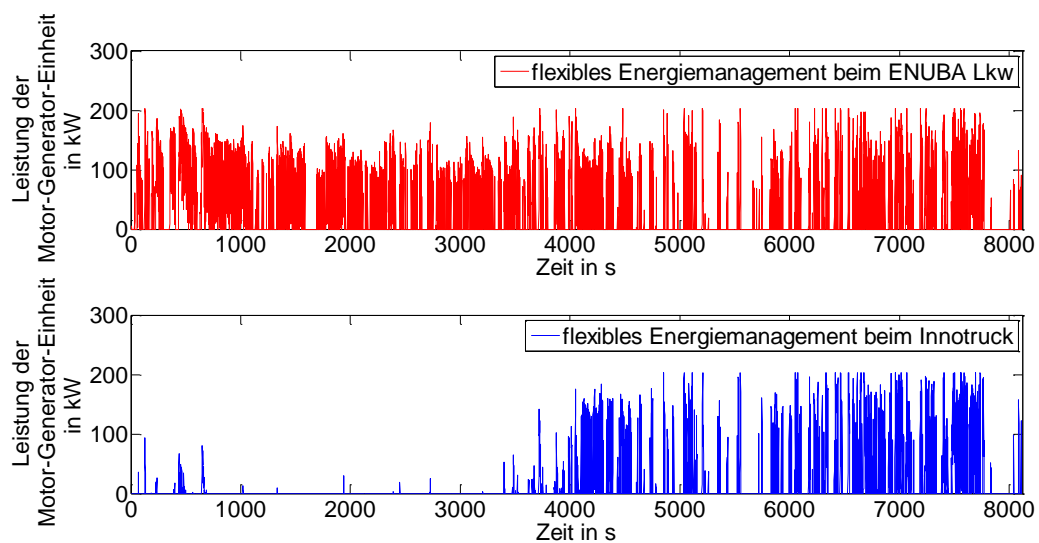


Abbildung 7.8: Leistungsbereitstellung der Motor-Generator-Einheit beim flexiblen Energiemanagement mit einer Antriebsstrangvariante mit Batterie (Innotruck) und mit Ultracaps (ENUBA Lkw)

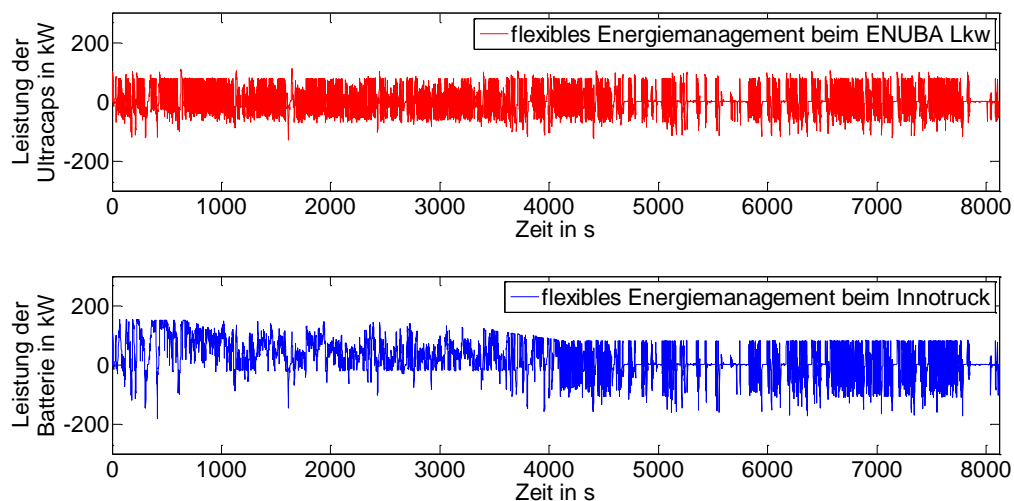


Abbildung 7.9: Leistungsbereitstellung des elektrischen Speichers beim flexiblen Energiemanagement mit einer Antriebsstrangvariante mit Batterie (Innotruck) und mit Ultracaps (ENUBA Lkw)

Der ladezustandsabhängige Gewichtungsfaktor der Batterie gibt vor, dass diese tiefer entladen werden kann als die Ultracaps, bevor der Speicher wieder geladen werden muss. Daher pendelt sich der Ladezustand bei 18% bei der Batterie, im Vergleich zu 30% bei den Ultracaps ein (Abbildung 7.10). Zusätzlich wird aufgrund der höheren Kapazität der Batterie der Bremswiderstand nicht genutzt und die volle Rekuperationsleistung durch den Speicher aufgenommen (Anhang D-3).

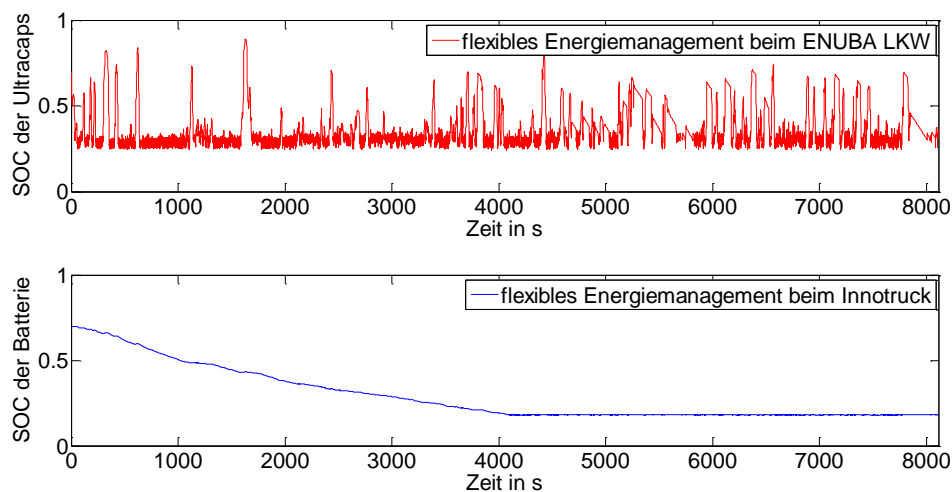


Abbildung 7.10: Ladezustand der elektrischen Speicher beim flexiblen Energiemanagement mit einer Antriebsstrangvariante mit Batterie (Innotruck) und mit Ultracaps (ENUBA Lkw)

Die Betriebskosten sind bei der Fahrzeugvariante mit der Batterie deutlich geringer (Tabelle 7.5, Anhang D-4, D-5, D-6), weil zu einem großen Teil die Leistung aus der Batterie bereitgestellt wird. Es wird angenommen, dass beim Innotruck, der ein Plug-in-Hybrid ist, die Batterie bis zum Anfangsladezustand von 70% durch das externe Netz geladen wurde. Daher werden auch diese Ladekosten zu Beginn für die Kosten-Leistungs-Funktion der Batterie angenommen. Da die Batterie am Ende der Fahrt nur einen Ladezustand von 18% aufweist, kann viel kostengünstige, durch das externe Netz bereitgestellte Leistung genutzt werden. Zusätzlich kann die rekuperierte Leistung vollständig aufgenommen werden.

Tabelle 7.5: Betriebskosten der Messfahrt beim flexiblen Energiemanagement im ENUBA Lkw und Innotruck

	flexibles Energiemanagement beim ENUBA Lkw	flexibles Energiemanagement beim Innotruck
Betriebskosten der Motor-Generator-Einheit in €	39,55	20,00
Betriebskosten der Speicher in €	0,17	3,94
Ausgleichskosten, um den Ausgangsladezustand zu erreichen in €	0,40	2,46
Gesamtbetriebskosten in €	40,12	26,40

7.3 Leistungsverteilung und Betriebskosten beim flexiblen Energiemanagement bei einer Fahrzeugvariante mit Oberleitung

Die Leistungsbereitstellung erfolgte während der in Kapitel 7.1 verglichenen Messfahrt ausschließlich über die Motor-Generator-Einheit und die Ultracaps, weil keine Oberleitungsstrecke während der Messfahrt vorhanden ist. Auf einer Teststrecke in Groß-Dölln wurde jedoch auch an der Oberleitung gefahren. Das regelbasierte Energiemanagement

sieht vor, sobald die Oberleitung vorhanden ist die Motor-Generator-Einheit abzuschalten. Gleiches Verhalten wird auch durch das flexible Energiemanagement erzielt. Sowohl beim Innotruck als auch beim ENUBA Lkw wird während der ganzen Fahrt keine Leistung von der Motor-Generator-Einheit oder dem Speicher gefordert (Anhang E-3, E-4, E-5, F-3, F-4, F-5). Stattdessen wird die Leistung nur aus der Oberleitung bezogen. Dabei liegt ebenfalls wieder eine ausgeglichene Energiebilanz zwischen den Energiekomponenten vor. Die Traktion als Senke und die Nebenverbraucher werden bei der Fahrt mit und ohne Oberleitung mit derselben Leistung versorgt (Anhang E-1, E-2, F-1, F-2).

Der Leistungsverlauf und der Ladezustandsverlauf der Ultracaps bei der Fahrt mit Oberleitung zeigen, dass die Ultracaps anfangs durch die Rekuperationsleistung geladen werden und dann beim maximalen Ladezustand verweilen (Anhang E-5). Durch die Rekuperation werden die Ladekosten zwar geringer und somit die Kosten für die Leistungsbereitstellung durch die Ultracaps, dennoch sind die Kosten aus dem externen Netz geringer. Daher werden die Ultracaps während der Fahrt nicht mehr entladen. Der Bremswiderstand wird während der Fahrt mit Oberleitung deutlich mehr genutzt, weil die Ultracaps aufgrund des Ladezustands nicht mehr Leistung aufnehmen können (Anhang E-7).

Die entstehenden Betriebskosten verringern sich deutlich durch die Oberleitung, insbesondere, wenn die Motor-Generator-Einheit zusätzlich abgeschaltet wird (Tabelle 7.6). Ein- und Ausschaltvorgänge werden im beschriebenen Konzept allerdings nicht berücksichtigt, so dass weiterhin Kosten für den Leerlaufverbrauch auftreten würden.

Tabelle 7.6: Betriebskosten der Messfahrt beim flexiblen Energiemanagement im ENUBA Lkw ohne und mit Oberleitung

	flexibles Energiemanagement beim ENUBA Lkw ohne Oberleitung	flexibles Energiemanagement beim ENUBA Lkw mit Oberleitung
Betriebskosten der Motor-Generator-Einheit in €	39,55	5,72 (für Leerlauf, wenn nicht ausgeschaltet wird)
Betriebskosten der Speicher in €	0,17	0,14
Ausgleichskosten, um den Ausgangsladezustand zu erreichen in €	0,40	0,38
Betriebskosten vom externen Netz	40,12	23,68
Gesamtbetriebskosten in €	39,55	29,92 (24,20 beim Ausschalten des Verbrennungsmotors)

Die Alterungskosten für die Batterie sind deutlich höher als für die Ultracaps. Daher werden die Kosten für die Leistungsbereitstellung durch die Batterie trotz stärkerer Rekuperation und damit verbundenen abnehmenden Ladekosten nicht geringer als die Kosten für die Leistungsbereitstellung durch das externe Netz. Folglich nimmt die Batterie während der gesamten Fahrt nur die Rekuperationsleistung auf und ist sonst nicht weiter an der Leistungsverteilung beteiligt (Anhang F-5). Das hat allerdings, im Vergleich zur Fahrt ohne Oberleitung, zur Folge, dass gegen Fahrtende nicht mehr alle Rekuperationsleistungen aufgenommen werden können und der Bremswiderstand Leistung aufnehmen muss (Anhang F-7).

Da zum Fahrtende des Innotrucks mit Oberleitung der Ladezustand im Vergleich zum Anfangszustand steigt, ergeben sich negative Kosten, weil Leistung aus der Batterie noch

Ergebnisse zur Leistungsverteilung und den Betriebskosten beim flexiblen Energiemanagement

bereitgestellt werden kann. Insgesamt steigen die Kosten leicht bei der Variante mit Oberleitung, weil nicht die gesamte kostenlose Leistung der Rekuperation im Fahrzeug aufgenommen werden kann und bei den Ausgleichskosten Alterungskosten vom Gewinn abgezogen werden wegen des höheren Ladezustands am Fahrtende.

Tabelle 7.7: Betriebskosten der Messfahrt beim flexiblen Energiemanagement im Innotruck ohne und mit Oberleitung

	flexibles Energiemanagement beim Innotruck ohne Oberleitung	flexibles Energiemanagement beim Innotruck mit Oberleitung
Betriebskosten der Motor-Generator-Einheit in €	20,00	5,72 (für Leerlauf wenn nicht ausge- schaltet wird)
Betriebskosten der Speicher in €	3,94	0,50
Ausgleichskosten um den Ausgangsladezustand zu erreichen in €	2,46	-0,74
Betriebskosten vom externen Netz	0,00	27,65
Gesamtbetriebskosten in €	26,40	33,13 (27,42 beim Aus- schalten der MGU)

8 Diskussion der Anforderungserfüllung des flexiblen Energiemanagements

Die Anforderungserfüllung wird auf Basis der Beschreibung des flexiblen Energiemanagements (Kapitel 5) und den Simulationsergebnissen (Kapitel 7) diskutiert.

8.1 Hauptanforderungen

Die Hauptanforderungen der Flexibilität und der Betriebskostenminimierung ergeben sich aus der Motivation für das Energiemanagement (Kapitel 1) und sind die wichtigsten Anforderungen an dieses.

8.1.1 Flexibilität

Bei dem beschriebenen flexiblen Energiemanagement ist es möglich, dass eine unterschiedliche Anzahl und verschiedene Ausprägungen von Energiekomponenten berücksichtigt werden, ohne dass sich der Kern des Energiemanagements ändert. Anhand der Simulationen mit dem flexiblen Energiemanagement bei Fahrzeugvarianten wurde veranschaulicht, dass beim Verändern des Speichers und beim Hinzufügen einer weiteren Quelle das Energiemanagement nach demselben Prinzip funktioniert (Kapitel 7.2 und 7.3). Es ist dadurch möglich, dass die Funktionen der Energiekomponenten im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen (Kapitel 2.3.7) unabhängig voneinander aufgestellt werden und als Input für den Leistungshandel dienen. Insbesondere die Kosten-Leistungs-Funktionen der Quellen basieren ausschließlich auf den Betriebskosten, die durch die jeweiligen Quellen verursacht werden. Die Prioritätsklassen der Senken können zudem unabhängig voneinander vergeben werden. In der Regel ist es trivial zu entscheiden, ob eine Senke unbedingt versorgt werden muss, ggf. nicht versorgt werden kann oder möglichst nicht genutzt werden sollte. Innerhalb der zweiten Prioritätsklasse müssen jedoch die Senken relativ zueinander bewertet werden. Diese Bewertung kann nur durch die Beurteilung des Kundenwunsches fahrzeugindividuell in Form einer Rangliste stattfinden. Eine allgemeingültige Festlegung, ob bspw. eine Klimaanlage höher priorisiert werden sollte als eine Sitzheizung ist nicht möglich.

Dennoch ist es nicht einfach möglich, alle Kosten-Leistungs-Funktionen direkt einem Energiehandel zuzuführen und entsprechend des Handelspreises die Leistungsverteilung vorzunehmen (Abbildung 8.1). Stattdessen muss erst eine Summenfunktion der Quellen erstellt werden, um die Bedingung hinsichtlich der monoton steigenden Gestaltung der Kosten-Leistungs-Funktionen zu erfüllen (Kapitel 5.1.2). Aus gleichem Grund muss kostenlos bereitgestellte Leistung vorab von den Senken-Funktionen abgezogen werden (Kapitel 5.2.2.3). Um sicherzustellen, dass bestimmte Senken versorgt werden, muss zudem die Parametrierung der Kosten-Leistungs-Funktionen der Senken unter Berücksichtigung der bereitzustellenden Leistung der Quellen erfolgen (Kapitel 5.2.3).

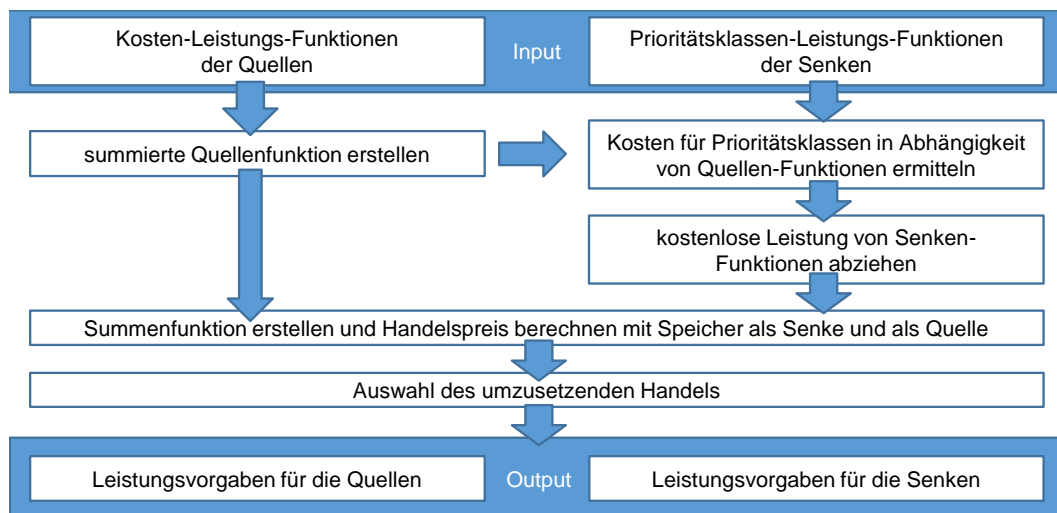


Abbildung 8.1: Schritte des flexiblen Energiemanagements

Ferner muss der Handel mit jedem Speicher als Senke und als Quelle durchgeführt werden (Kapitel 5.2.4). Anschließend wird anhand der Differenz der Handelspreise und dem ladezustandsabhängigen Gewichtungsfaktor entschieden, ob ein Speicher als Quelle oder Senke dient. Die untere Grenze des Ladezustands, ab dem der Speicher wieder geladen wird, hängt davon ab, wie lange die maximale Antriebsleistung bereitgestellt werden können soll. Dieser Ladezustand sollte bei einem autarken parallelen Hybrid höher eingestellt werden als bei einem seriellen Plug-in Hybrid. Die Betriebskosten eines Plug-In Hybrid verringern sich, wenn die kostengünstigere Leistung aus dem externen Netz im Speicher genutzt wird, anstatt den Ladezustand zu erhalten (Kapitel 7.2). Vor allem ein paralleler Hybrid büßt stark bei der Antriebsleistung ein, wenn der Ladezustand gering ist. Liegen mehrere Speicher im Fahrzeug vor, muss der ladezustandsabhängige Gewichtungsfaktor beider Speicher aufeinander abgestimmt werden, um in Summe die maximale Antriebsleistung für eine gewisse Zeit bereitstellen zu können. Folglich hängt die Gestaltung des ladezustandsabhängigen Gewichtungsfaktors von der Hybridvariante und der maximalen Leistungsfähigkeit aller Komponenten ab. Somit benötigt das flexible Energiemanagement Informationen über den grundsätzlichen Aufbau des Gesamtsystems für den Betrieb des Speichers. Zusammenfassend ist die Anforderung der Flexibilität erfüllt, hierfür sind jedoch einige zusätzliche Schritte neben dem einfachen Summieren aller Kosten-Leistungs-Funktionen, dem Finden des Handelspreises und dem Einsetzen in die Funktionen der Komponenten nötig.

8.1.2 Betriebskostenminimierung

Die Betriebskostenminimierung wird einerseits durch die kostengünstigste Betriebspunktwahl der Quellen für jede Leistungsbereitstellung erreicht (Kapitel 5.2.2). Andererseits wird das Ziel dadurch erreicht, dass durch die Erstellung der Summenfunktion der Quellen eine Rangliste vorliegt, die immer die Quelle oder die Kombination aus Quellen mit den geringsten Betriebskosten für jede Leistungsanforderung vorschlägt (Kapitel 5.1.2). Neben der kostengünstigen Bereitstellung für einen gegebenen Leistungswunsch könnte aber auch der Leistungsbedarf möglichst gering gehalten werden, um Betriebskosten einzusparen. Dabei eignen sich vor allem thermische Nebenverbraucher für kurzzeitige Abschaltungen (Kapitel 5.2.3.2). Da beim flexiblen Energiemanagement nur Betriebskosten für die Quellen berücksichtigt werden, wird beim Speicher als Senke nicht direkt berücksichtigt, dass beim Laden des Speichers auch Alterungskosten entstehen. Das liegt da-

ran, dass Senken-Funktionen nur die Priorität wiedergeben, mit der sie versorgt werden sollen.

Für die Berechnung der Betriebskosten für die Kosten-Leistungs-Funktionen der Quellen wurden vergleichsweise einfache Berechnungen verwendet (Kapitel 5.2.2). Eine genaue Berechnung bspw. der Alterung der Batterie kann theoretisch zu einer etwas besseren Leistungsverteilung hinsichtlich der Betriebskostenminimierung führen. Allerdings muss bei der im Fahrzeug gegebenen Sensorik berücksichtigt werden, dass die Messfehler größer sein können als die Genauigkeit der Berechnung zunimmt (Kapitel 5.2.2.4). Zudem sollte die Berechnung nicht zu spezifisch sein, damit sie beispielweise für alle Lithium-Ionen Batterien verwendet werden kann. Außerdem muss der Rechenaufwand der Betriebskostenminimierung gegenübergestellt werden.

Wie die Gegenüberstellung mit dem regelbasierten Energiemanagement zeigt, ergeben sich etwas geringere Betriebskosten mit dem flexiblen Energiemanagement (Kapitel 7.1). Dies liegt vor allem an der stärkeren Nutzung des Speichers. Optimierende Energiemanagementverfahren unterscheiden sich meist darin, wie groß der Einsatz des Speichers ist und die damit verbundene Kraftstoffeinsparung ist, aber auch dem vorzeitigeren Lebensdauerende des Speichers [Fad11, S. 3271–3272], [Kok06, S. 95]. Das flexible Energiemanagement hat nur ein Optimierungsziel, die Betriebskostenminimierung. Daher werden die Speicheralterung sowie der Kraftstoffverbrauch in Betriebskosten umgerechnet.

Nicht berücksichtigt bei der Berechnung der Betriebskosten sind erhöhte Kosten in Folge dynamischer Vorgänge. Die Berechnungen sind quasistatisch. Der Kraftstoffverbrauch der Motor-Generator-Einheit basiert z.B. auf einem statischen Kennfeld. Es kann sein, dass erhöhte Kosten durch das ständige Flattern der Leistungsvorgabe für die Motor-Generator-Einheit entstehen (Kapitel 7.1, Kapitel 7.2). Dadurch kann es sein, dass das flexible Energiemanagement höhere Kosten verursacht als das regelbasierte Energiemanagement. Zudem wird der Fahrkomfort bei einem ständigen Zu- und Abschalten der Verbrennungsmotor-Generator-Einheit negativ beeinflusst [Göh97, S. 34].

Um das Flattern zu vermeiden, könnten Hysteresen eingeführt und somit schnelle Zustandswechsel vermieden werden [Ser09a, S. 111], [Wag04, S. 107]. Bspw. können, sobald eine Leistungsanforderung für eine Quelle gefordert wird, die Kosten jeder einzelnen bereitzustellenden Leistung für eine gewisse Zeit künstlich geringer gehalten werden und erst langsam wieder auf den eigentlichen Wert steigen, um die Wahrscheinlichkeit zu steigern, dass diese Quelle in den kommenden Zeit-Schritten wieder ausgewählt wird und nicht direkt andere Quellen stattdessen die Leistung bereitstellen.

Eine weitere Lösungsmöglichkeit wäre es, bei der Erstellung der summierten Quellenfunktion einzugreifen. Die summierte Funktion kann, wenn die Motor-Generator-Einheit einmal verwendet wurde, so angepasst werden, dass für eine gewisse Zeit die Kosten-Leistungs-Funktion der Motor-Generator-Einheit bei niedrigen Kosten abgebildet wird, und dann erst die kostengünstigsten Quellenkombinationen hinzugeschaltet werden. Beide Möglichkeiten haben jedoch zu Folge, dass nicht mehr die geringsten Betriebskosten erzielt werden.

Eine dritte Möglichkeit wäre, die Kosten für den dynamischen Wechsel bzw. negativen Fahrkomfort zu quantifizieren und bei den Kosten-Leistungs-Funktionen aller Komponenten bis auf die der Motor-Generator-Einheit zu addieren. Ist die Leistungsbereitstellung durch eine andere Quelle dann trotzdem noch kostengünstiger, sollte dieser erfolgen. Sobald der Wechsel stattgefunden hat, dürfen die zusätzlichen Kosten nicht mehr zu den Kosten-Leistungs-Funktionen addiert werden. Allerdings ist eine Quantifizierung des Fahrkomforts in Betriebskosten schwierig.

Bisher wurde beim beschriebenen Ansatz angenommen, dass die Motor-Generator-Einheit zwar keine Leistung, entsprechend der Vorgaben zur grundlegenden Gestaltung der Kosten-Leistungs-Funktionen, bereitstellen kann (Kapitel 5.2.1), dann aber Leerlaufkosten entstehen. Um diese zu vermeiden, kann der Verbrennungsmotor, wenn die Leistungsanforderung gleich Null ist, ausgeschaltet werden. Allerdings stellt dieser im Anschluss eine Senke während des Startvorgangs dar. Der Fall, dass im Fahrzeug noch Energie in einer Quelle vorhanden ist, diese aber aufgrund der nötigen Leistung zum Startvorgang nicht bereitgestellt werden kann, muss vermieden werden. Der Start des Verbrennungsmotor muss gewährleistet werden, bevor andere Quellen wie die elektrischen Speicher keine Leistung mehr bereitstellen können [Rei14, S. 225], [Wag04, S. 93], [Bra13, S. 449].

Wird die Motor-Generator-Einheit als Senke mit einer hohen Prioritätsklasse bewertet, wird sie direkt wieder gestartet. Wird die Motor-Generator-Einheit als Senke hingegen mit einer niedrigen Prioritätsklasse bewertet, kann es passieren, dass bspw. der Ladezustand der Speicher so weit absinkt, dass die Senke nicht mehr versorgt werden kann und der Wiederstart nicht mehr möglich ist. Folglich kann die Motor-Generator-Einheit nicht einfach als Senke im Handel teilnehmen.

Eine Möglichkeit wäre ein Optionenhandel, bei dem die Motor-Generator-Einheit als Senke eine Option auf eine Startleistung kauft, die eingesetzt wird, sobald sie Leistung bereitstellen soll. Dazu muss es allerdings möglich sein, dass die Motor-Generator-Einheit in einem Berechnungsschritt erst eine Senke zum Starten ist und danach die geforderte Leistung bereitstellen kann. Dadurch würde sich die Schrittweite auf mindestens 2 Sekunden verdoppeln. Ein Optionenhandel wäre eine Art zusätzlicher Handel, der dann stattfindet, wenn eine Quelle, die zum Wiederstart Leistung benötigt, keine Leistung liefern soll und somit abgeschaltet wird. Die Quelle, welche die Option am kostengünstigsten verkauft, muss in dem folgenden Handeln die bereitzustellende Startleistung reservieren und von der bestehenden Kosten-Leistungs-Funktion abziehen, so dass diese nicht mehr gehandelt werden kann. Ein Problem ergibt sich bei Quellen, die nicht dauerhaft im Fahrzeug sind, wie bspw. das externe Netz bei einer Oberleitung. Diese Quellen müssen vom Optionenhandel ausgeschlossen werden [Bui13, S. 355–356]. Alternativ ist es auch möglich, regelbasiert vorab Komponenten festzulegen, welche die Wiederstartfähigkeit sichern und beim Abschalten der wieder zu startenden Quelle die Kosten-Leistungs-Funktion anpassen. So darf bspw. die Batterie, sobald die Motor-Generator-Einheit ausgeschaltet wird, nicht mehr einen bestimmten Ladezustand unterschreiten und muss die bereitzustellende Leistung weiter begrenzen. Ist der Ladezustand bereits unterschritten, muss allerdings das Abschalten verhindert werden, auch dann wenn eine dritte Quelle die Leistung bereitstellen könnte.

8.1.3 Zusammenfassung der Diskussion zu den Hauptanforderungen

Die Bewertung zur Erfüllung der Hauptanforderungen, sowie Einschränkungen und Verbesserungspotenzialen sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst.

Tabelle 8.1: Zusammenfassung der Diskussion zu den Hauptanforderungen

Anforderung	Bewertung	Einschränkungen und Verbesserungspotenzial
Flexibilität	Anforderung ist erfüllt und wurde demonstriert (Kapitel 7.2, 7.3)	<ul style="list-style-type: none"> fahrzeugindividuelle Bewertung der Priorität der Senken Berechnungsschritte vor und nach dem Energiehandel nötig (Abbildung 8.1) ladezustandsabhängiger Gewichtungsfaktor für Speicher abhängig von Hybridvariante
Betriebskostenminimierung	kostenoptimale Leistungsbereitstellung entsprechend der Betriebskostenberechnung der Quellen	<ul style="list-style-type: none"> Leistungsbedarfseinsparungen ggf. möglich bei thermischen Nebenverbrauchern Betriebskostenberechnung für dynamische Vorgänge zusätzlich möglich, insbesondere zur Vermeidung des Flatterns der Steuergrößen Einsparpotenzial durch komplettes Abschalten des Verbrennungsmotors, dazu aber Sicherstellung der Wiederstartfähigkeit

8.2 Anforderungen auf Gesamtfahrzeugebene

Bei den Anforderungen auf Gesamtfahrzeugebene handelt es sich um das Sicherstellen der Energiebilanz, den Umgang mit mehreren Energieknotenpunkten, den minimalen Datenaustausch und die Rechenleistung (Kapitel 4).

8.2.1 Energiebilanz sicherstellen

Die Anforderung des Sicherstellens einer quasistationären Energiebilanz wird dadurch erfüllt, dass beim Handelspreis, der Nullstelle der Summenfunktion, genau dieselbe Leistung durch die Quellen bereitgestellt wird, die durch die Senken aufgenommen wird (Kapitel 5.1.2). Allerdings bestimmt die Anzahl der Diskretisierungsstufen der Kosten, wie genau die Nullstelle der Summenfunktion über eine lineare Interpolation zwischen dem kleinsten positiven Wert und dem kleinsten negativen Wert der Summenfunktion berechnet werden kann (Abbildung 8.2). Wird der berechnete Handelspreis in die Kosten-Leistungs-Funktionen der einzelnen Komponenten eingesetzt, bestimmt hier wiederum die Anzahl der Diskretisierungsstufen der Leistung, wie genau die Leistungsvorgabe berechnet wird und somit die Leistungsbilanz von Null abweicht. Mehr Diskretisierungsstufen haben allerdings einen höheren Rechenbedarf und eine größere Datenübertragung zur Folge.

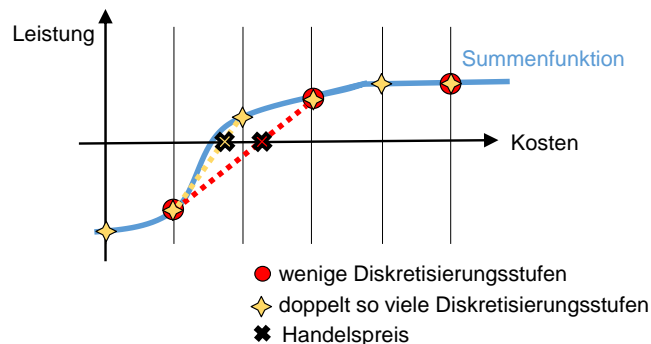


Abbildung 8.2: Einfluss der Diskretisierungsstufen auf die Energiebilanz

Die Zeiten, welche die dezentralen Regelungen der Energiekomponenten benötigen, um die geforderte Leistung tatsächlich zu erreichen, können jedoch unterschiedlich lang sein. Insbesondere beim Betrieb des Verbrennungsmotors ist es nicht möglich, sehr schnell veränderte Leistungsforderungen umzusetzen. Die entstehenden Energiemengen können bspw. durch einen Zwischenkreiskondensator bei einem seriellen Hybrid gepuffert werden. Zudem kann auch die Dynamik der Regelungen von Komponenten mit schnelleren Ansprechzeiten künstlich begrenzt werden, um gleichzeitig auf eine Forderung vom Energiemanagement zu reagieren [Ser09a, S. 125].

8.2.2 Umgang mit mehreren Energieknotenpunkten

Die Energiekomponenten eines zweiten Energieknotenpunktes werden summiert und unter Berücksichtigung der Leistungsverluste bei der Energiewandlung in einem ersten Energieknotenpunkt berücksichtigt (Kapitel 5.1.3). Somit ist die Anforderung erfüllt, dass der Umgang mit mehreren Energieknotenpunkten möglich ist. Um eine quasistatische Energiebilanz zu erzielen, muss durch die Synchronisation der sekundären mit der primären Entscheidungslogik sichergestellt werden, dass die Leistungsanforderungen zur gleichen Zeit den Energiekomponenten des sekundären Energieknotenpunktes vorgegeben werden wie denen des primären Energieknotenpunktes. Ändert sich in einem sekundären Energieknotenpunkt aufgrund der Nebenverbraucher der Leistungsbedarf schneller, kann ein Speicher wie im primären Energieknotenpunkt als Puffer dienen.

8.2.3 Geringer Datenaustausch

Durch die dezentrale Regelung der Energiekomponenten in der zweiten Ebene reduziert sich der Datenaustausch im Gesamtfahrzeug zwischen allen Komponenten deutlich, da nur eine Leistungsvorgabe vom Energiemanagement zu den Energiekomponenten übertragen werden muss (Kapitel 5.1.1). Die Energiekomponenten können entweder die Kosten-Leistungs-Funktionen selbst verwalten und diese der Zentraleinheit mitteilen oder von der Zentraleinheit verwalten lassen und Zustandsdaten sowie Betriebsgrenzen übermitteln (Kapitel 5.1.2). Die beschriebenen Berechnungen der Funktionen der Energiekomponenten hängen hauptsächlich von Parametern ab, die sich während der Fahrt nicht ändern, so dass bspw. die Kosten-Leistungs-Funktion der Motor-Generator-Einheit bereits vor Fahrtbeginn berechnet werden kann (Kapitel 5.2). Die Speicher müssen laufend ihren aktuellen Ladezustand übertragen und die aktuellen Ladekosten berechnen. Die Kosten-Leistungs-Funktion eines Speichers kann auf dieser Basis parametrisiert werden. Zudem sollten alle Energiekomponenten außerplanmäßige Betriebsgrenzen übermitteln können, bspw. wenn eine Komponente überhitzt ist oder einen Defekt hat. Für die Parametrierung der Kosten-Leistungs-Funktionen der Traktion und der Nebenverbraucher sind Fahrervorgaben notwendig. Diese können auch direkt einmal an die Zentraleinheit übermittelt werden anstatt an die Komponenten. Folglich führt die Parametrierung der Kosten-Leistungs-Funktionen auf Basis der wenigen berücksichtigten Zustandsdaten zu einem geringeren Datenaustausch als die Übertragung aller Kosten-Leistungs-Funktionen der Komponenten zu jedem Zeitschritt.

Eine Schwierigkeit bei der Berechnung der Betriebskosten ist, dass hierzu zum einen Komponentendaten, bspw. zum Wirkungsgrad, vorliegen müssen, aber auch Daten, außerhalb des Fahrzeugs liegen, wie z.B. Kraftstoffpreise, Strompreise oder ein Wiederverkaufswert der Batterie. Diese Daten sind für die Berechnung notwendig und müssten beim Tanken oder beim Beziehen von elektrischer Leistung durch das externe Netz vom Fahrer eingegeben oder automatisch bezogen werden.

8.2.4 Geringer Rechenaufwand

Die Anzahl der Speicher im Fahrzeug erhöht den Rechenaufwand stärker als das Hinzufügen von Energiekomponenten, die nur Quelle oder Senke sind. Das liegt nicht nur daran, dass zwei Kosten-Leistungs-Funktionen erstellt werden müssen, sondern vor allem daran, dass mehrere Handel durchgeführt und miteinander verglichen werden müssen. Die Anzahl der Handel in Abhängigkeit der Speicher entspricht $2^{\text{AnzahlSpeicher}}$ Handel. Eine rechenarme Erstellung der summierten Quellenfunktion ist nur möglich, wenn sich die Kosten-Leistungs-Funktionen nicht kreuzen (Kapitel 5.1.2). Die beschriebenen Kosten-Leistungs-Funktionen der Quellen sind linear (Kapitel 5.2.2), so dass sie sich nicht kreuzen können. Somit steigt der Aufwand zur Erstellung der summierten Quellenfunktion nur linear mit der Anzahl an Quellen.

Nachdem alle Kosten-Leistungs-Funktionen erstellt wurden, können der Handelspreis und die damit verbundene Leistungsverteilung schnell berechnet werden, weil lediglich ein einfacher Nullstellenfindungsalgorithmus benötigt wird sowie die Bestimmung der zugehörigen Leistungswerte zum Handelspreis in den Kosten-Leistungs-Funktionen der Komponenten. Der Rechenaufwand steigt nur linear mit der Anzahl der berücksichtigten Energiekomponenten, sofern es sich bei den hinzugefügten Komponenten nicht um Speicher handelt. Im Vergleich dazu liegt ein exponentiellen Anstieg des Rechenaufwands bei einer linear steigenden Anzahl betrachteter Komponenten bei vielen anderen optimierenden Verfahren vor (Kapitel 2.4).

8.2.5 Zusammenfassung der Diskussion zu den Anforderungen auf Gesamtfahrzeugebene

Die Bewertung zur Erfüllung der Anforderungen auf Gesamtfahrzeugebene, sowie Einschränkungen und Verbesserungspotenzialen sind in Tabelle 8.2 zusammengefasst.

Tabelle 8.2: Zusammenfassung der Diskussion zu den Anforderungen auf Gesamtfahrzeugebene

Anforderung	Bewertung	Einschränkungen und Verbesserungspotenzial
Energiebilanz sicherstellen	<ul style="list-style-type: none"> Anforderung erfüllt durch Nullstellenfindung der Summenfunktion 	<ul style="list-style-type: none"> Genauigkeit der Nullstelle abhängig von den Diskretisierungsstufen kurzzeitige Leistungspufferung und/ oder Dynamikbegrenzung der Komponentenregler nötig
Umgang mit mehreren Energieknotenpunkten	<ul style="list-style-type: none"> Anforderung erfüllt durch hierarchischen Aufbau (Kapitel 5.1.3) 	<ul style="list-style-type: none"> Synchronisation zwischen Ansteuerung der Energieknotenpunkte erforderlich
geringer Datenaustausch	<ul style="list-style-type: none"> Anforderung erfüllt durch minimale Anzahl an zu übertragenden Daten 	<ul style="list-style-type: none"> Neben Komponentendaten werden Daten von außerhalb des Fahrzeugs (zb Strompreis) benötigt
geringer Rechenaufwand	<ul style="list-style-type: none"> Anforderung erfüllt durch wenige einfache Rechenschritte 	<ul style="list-style-type: none"> Rechenaufwand steigt stärker mit Zunahme von Speichern, als von anderen Komponenten

8.3 Anforderungen auf Komponentenebene

Bei den aufgestellten Anforderungen auf Komponentenebene handelt es sich um die Berücksichtigung der Betriebsgrenzen, das Sicherstellen der Versorgung der sicherheitskritischen Verbraucher, das Umsetzen des Fahrerwunsches, die Fähigkeit dynamisch die Berechnungen durchzuführen und die Minimierung des Rechenaufwands pro Komponente. Diese Anforderungen sollen alle durch die Gestaltung der Kosten-Leistungs-Funktionen erfüllt werden (Kapitel 5.2).

8.3.1 Betriebsgrenzen berücksichtigen

Durch die Kosten-Leistungs-Funktionen wird lediglich die absolute Leistungsgrenze der Energiekomponenten festgelegt (Kapitel 5.2.1). Eine Begrenzung von weiteren Größen, wie der Drehzahl des Verbrennungsmotors in der Motor-Generator-Einheit oder des Drehmoments des Elektromotors, erfolgt nicht durch die Gestaltung der Funktionen. Die Sicherstellung dieser Betriebsgrenzen erfolgt somit nicht auf Gesamtfahrzeugebene im Energiemanagement. Da jedoch beim flexiblen Energiemanagementsystem vorgesehen wird, dass auf einer zweiten Ebene unter dem Energiemanagement dezentrale Steuergeräte für die Komponenten vorliegen, können diese für die Berücksichtigung weiterer Betriebsgrenzen zuständig sein (Kapitel 5.1.1). Für die Leistungsverteilung ist die Information, ab wann bspw. eine Drehzahlüberschreitung bei einer Energiekomponente vorliegt irrelevant, solange die angegebene Leistung umgesetzt werden kann. Somit führt das Sicherstellen aller Betriebsgrenzen bis auf die Leistungsgrenze auf Komponentenebene, zu einer Minimierung des Datenaustausches. Zudem können die dezentralen Regelungen der Komponenten viel schneller auf das Überschreiten von Betriebsgrenzen reagieren als ein übergelagertes Steuergerät.

8.3.2 Sicherheitskritische Verbraucher versorgen

Sicherheitskritische Verbraucher werden der Prioritätsklasse 1 zugeordnet. Da Senken dieser Klasse Leistung bis zu den Kosten bezieht, bei dem die Summe der Quellen die maximale Leistung abgibt, werden sie, sofern es durch die Quellen aktuell möglich ist, immer versorgt (Kapitel 5.2.3). Außerdem bekommen Senken mit einer niedrigeren Prioritätsklasse nicht bis zu den genannten Kosten den maximalen Leistungswunsch. Dadurch wird erreicht, dass, wenn die Leistungsbereitstellung begrenzt ist, zuerst die wichtigsten Verbraucher versorgt werden. Bei einem Speicher kann zudem über den ladezustandsabhängigen Gewichtungsfaktor festgelegt werden, dass eine bestimmte untere Ladezustandsgrenze und somit minimale Leistungsabgabemöglichkeit nicht unterschritten wird (Kapitel 5.2.4). Dennoch kann durch das Energiemanagement alleine nicht garantiert werden, dass immer die nötige Leistung bereitgestellt werden kann. Dazu ist eine entsprechende Auslegung der Fahrzeug-Energiekomponenten nötig. Das Energiemanagement kann nur sicherstellen, dass die bestmögliche Ausnutzung der verfügbaren Systemleistung gegeben ist.

8.3.3 Fahrervorgaben umsetzen

Der Antriebs- und Bremswunsch des Fahrers, geäußert durch die Gas- und Bremspedalstellung, wird durch die Fahrsteuerung in eine Leistungsvorgabe des Traktionsmotors umgerechnet. Das flexible Energiemanagement übernimmt diese Berechnung vom regelbasierten Energiemanagement des ENUBA Lkw (Kapitel 5.2.2.3 und Kapitel 5.2.3.1). Wird

davon ausgegangen, dass dies die richtige Deutung des Fahrerwunsches ist, wird durch die Eingruppierung des Traktionsmotors als Senke mit der Prioritätsklasse 1 im Antriebsfall sichergestellt, dass der Antriebswunsch erfüllt wird, weil die Senke immer die geforderte Leistung bekommt. Der Bremswunsch entsprechend der Bremspedalstellung wird ebenfalls in eine Bremsleistung, verteilt auf die mechanische und generatorische Bremse, umgerechnet. Da die Rekuperationsleistung direkt von den Senkenfunktionen vor dem Handel abgezogen wird, wird auch hier sichergestellt, dass diese Leistung immer umgesetzt wird (Kapitel 5.2.2.3). Während der Messfahrt wird bei allen Fahrzeugvarianten sowohl die geforderte Antriebsleistung also auch die Rekuperationsleistung des Traktionsmotors, wie von dieser Energiekomponente gefordert, bereitgestellt und aufgenommen (Kapitel 7).

8.3.4 Dynamische Berechnung und minimaler Rechenaufwand

Eine dynamische Berechnung der Kosten-Leistungs-Funktionen ist beim flexiblen Energiemanagement möglich und wird bspw. bei der Kosten-Leistungs-Funktion der Ultracaps und der Batterie als Quelle (Kapitel 5.2.2.4 und 5.2.2.5) bei dem aktuellen Ladezustand jeweils vorgenommen. Es wäre jedoch auch möglich, ein Kennfeld für die Kosten-Leistungs-Funktionen der Speicher in Abhängigkeit des Ladezustands und der Ladekosten aufzustellen. Werden alle Kosten-Leistungs-Funktionen auf diese Weise erstellt, könnten sogar einmalig bei der Inbetriebnahme des Fahrzeugs Kennfelder erstellt werden, die in Abhängigkeit der wenigen berücksichtigten Zustandsdaten vorab die Leistungsverteilung für verschiedene Zustände speichern. Somit wäre der Rechenaufwand während der Fahrt noch geringer. Zudem hängt auf Komponentenebene der Rechenaufwand für die Erstellung der Kosten-Leistungs-Funktionen stark von den berücksichtigten Größen ab. Er kann jedoch gering gehalten werden, weil einige Effekte, wie bspw. Wartungskosten der Motor-Generator-Einheit oder auch Alterungskosten der Ultracaps vernachlässigbar gering sind.

8.3.5 Zusammenfassung der Diskussion zu den Anforderungen auf Komponentenebene

Die Bewertung zur Erfüllung der Anforderungen auf Komponentenebene, sowie Einschränkungen und Verbesserungspotenzialen sind in Tabelle 8.3 zusammengefasst.

Tabelle 8.3: Zusammenfassung der Diskussion zu den Anforderungen auf Komponentenebene

Anforderung	Bewertung	Einschränkungen und Verbesserungspotenzial
Betriebsgrenzen berücksichtigen	Leistungsgrenzen sind durch Kosten-Leistungsfunktionen gewährleistet	weitere Betriebsgrenzen durch Komponentenregelung sicherzustellen
Sicherheitskritische Verbraucher versorgen	Versorgung entsprechend der Möglichkeiten im Fahrzeug sichergestellt	kann nur mit entsprechender Komponentenauslegung garantiert werden
Fahrervorgaben umsetzen	Anforderung ist erfüllt (Kapitel 7)	richtige Deutung des Fahrerwunschs auf Basis der Fahrereingaben nötig
Dynamische Berechnung und minimaler Rechenaufwand	dynamische Berechnung ist durch das flexible Energiemanagement möglich, verursacht jedoch höheren Rechenaufwand	ein Zielkonflikt liegt vor und die Ziele müssen gegeneinander gewichtet werden

9 Zusammenfassung und Ausblick

Auf Nutzfahrzeughersteller steigt der Druck, Fahrzeuge mit immer geringeren Emissionen zu entwickeln. Durch elektrische und hybride Fahrzeuge können dennoch zukünftige gesetzliche Grenzwerte eingehalten werden. Aufgrund der Freiheitsgrade in der Energieverteilung benötigen Hybridfahrzeuge im Gegensatz zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen ein Energiemanagement. Da sich die Nutzfahrzeugbranche durch einen starken Kostendruck und eine große Variantenvielfalt auszeichnet, muss das Energiemanagement die beeinflussbaren Betriebskosten minimieren und so gestaltet werden, dass es flexibel bei Fahrzeugvarianten eingesetzt werden kann, ohne jeweils viel Entwicklungsaufwand zu benötigen (Kapitel 1).

Aufgabe des Energiemanagements ist es, die Leistungsverteilung im Fahrzeug zu jedem Zeitschritt festzulegen. Hierfür können unterschiedlichste Verfahren eingesetzt werden. Um ein globales Optimum hinsichtlich der Leistungsverteilung zu erreichen, wird eine Optimalsteuerung berechnet. Da diese aber nicht online im Fahrzeug einsetzbar ist, weil dazu alle Daten über die Fahrt vorliegen müssten, eignet sich dieses Verfahren nur für theoretische Untersuchungen und wurde daher nicht weiter betrachtet. Eine modellprädiktive Regelung hingegen kann im Fahrzeug eingesetzt werden und eine lokal optimale Leistungsverteilung berechnen, benötigt aber genaue Prognosen über die Zukunft. Zudem ist sie sehr rechenintensiv und somit nicht für alle Fahrzeugvarianten einsetzbar. Ein Wissen über die Leistungsflüsse zum elektrischen Speicher im Fahrzeug setzt das Äquivalenzwertverfahren voraus, das bspw. äquivalente Verbräuche über die Batterie denen aus einem Verbrennungsmotor gegenüberstellt. Dieses Verfahren ist somit nicht flexibel einsetzbar für unterschiedliche Fahrzeugvarianten. Auch regelbasierte Verfahren, sowie Fuzzy Logik bieten sich für einen flexiblen Einsatz nicht an, weil für jede Fahrzeugvariante der Regelsatz verändert werden muss, um eine Leistungsverteilung festzulegen, die geringe Betriebskosten verursacht. Werden Regeln aus optimierenden Verfahren abgeleitet, muss das für jedes Fahrzeug spezifisch durchgeführt werden. Ein bestehendes Verfahren, das marktbasierter Ansatz, beweist jedoch, dass auf Basis von Kosten-Leistungs-Funktionen der Komponenten flexibel ein Handelspreis ermittelt und die Leistungsverteilung optimal festgelegt werden kann. Dieses Verfahren wurde bisher jedoch nur für ein Verbrauchermanagement, also die Leistungsverteilung auf verschiedene Senken, entwickelt (Kapitel 2).

Basierend auf den Zielen für ein flexibles, betriebskostenminimierendes Energiemanagement und dem Stand der Wissenschaft stellt sich die wissenschaftliche Frage, ob ein marktbasierter Ansatz auch für ein holistisches flexibles Energiemanagement geeignet ist, der ein Verbraucher- und Erzeugermanagement vereint (Kapitel 3).

Um diese Fragen zu beantworten, werden zuerst die Anforderungen an ein solches flexibles Energiemanagement aufgestellt. Neben den beiden Hauptanforderungen der Flexibilität und der Betriebskostenminimierung werden weitere Anforderungen auf Gesamtfahrzeugebene und Komponentenebene aufgestellt (Kapitel 4).

Anforderungsorientiert wird ein flexibles Energiemanagement erstellt, das über eine zentrale Steuerungsebene Energiekomponenten auf einer zweiten Ebene Leistungsvorgaben vorgibt, die dezentral umgesetzt werden. Alle Energiekomponenten werden über Kosten-Leistungs-Funktionen in einem Handel berücksichtigt, in dem ein Handelspreis ermittelt wird, der die Leistung festlegt, die jede Komponente bereitstellen bzw. aufnehmen soll. Liegen mehrere Energieknotenpunkte vor, wird ein hierarchisches Energiemanagement

durchgeführt, bei dem die Komponenten eines Knotenpunktes gebündelt beim Handel des anderen Knotenpunktes am Handel teilnehmen. Die Kosten-Leistungs-Funktionen der Energiekomponenten müssen nach festen Gestaltungsvorgaben aufgebaut werden, damit ein Handel zustande kommen und eine Leistungsverteilung berechnet werden kann. Die Berechnung der Kosten-Leistungs-Funktionen für alle Energiekomponenten zweier Referenzfahrzeuge wurde aufgezeigt. Dabei handelt es sich um die Funktionen der Motor-Generator-Einheit, des externen Netzes, der Traktion bei Rekuperation, der Batterie und der Ultracaps als Quelle und der Traktion beim Antrieb, der Nebenverbrauchern und elektrischen Speicher als Senke. Da Speicher wie Batterie und Ultracaps entweder als Quelle oder Senke wirken können, wird für jeden Speicher jeweils zweimal ein Handel berechnet. Anschließend werden die Leistungsvorgaben des Handels umgesetzt, der kostengünstiger ist, allerdings gewichtet um einen ladezustandsabhängigen Faktor (Kapitel 5).

Um das entwickelte flexible Energiemanagement zu untersuchen, wird ein modulares Fahrzeugmodell bestehend aus mehreren Quellen, Senken und Speichern aufgebaut. Die Komponenten werden so parametrisiert, dass das Referenzfahrzeug, der ENUBA Lkw, abgebildet wird. Statt der Ultracaps des ENUBA Lkw kann auch eine weitere Fahrzeugvariante, der Innotruck mit einer Batterie abgebildet werden, der entsprechend der Komponente im Realfahrzeug parametrisiert wird. Um das flexible Energiemanagement mit dem regelbasierten Energiemanagement im ENUBA Lkw vergleichen zu können, werden die Komponentenmodelle nach der entsprechenden Parametrisierung verifiziert (Kapitel 6).

Das flexible Energiemanagement verursacht im Vergleich zum regelbasierten Energiemanagement im ENUBA Lkw etwas geringere Betriebskosten, weil die Motor-Generator-Einheit weniger genutzt wird und dafür der Speicher mehr. Es fällt jedoch auf, dass die Leistungsvorgaben vom flexiblen Energiemanagement deutlich mehr flattern, weil der Speicher ständig abwechselnd als Quelle und Senke genutzt wird. Die Flexibilität des Ansatzes wurde demonstriert, indem dieser für einen geänderten Speicher (Batterie statt Ultracaps) genauso eingesetzt werden konnte wie beim Hinzufügen einer weiteren Quelle (Oberleitung). Ist eine Batterie mit einer deutlich höheren Kapazität vorhanden, wird diese, aufgrund der kostengünstigeren Leistungsbereitstellung, mehr genutzt. Zudem können dann größere Rekuperations-Energiemengen zwischengespeichert werden. Wird eine Oberleitung hinzugefügt, übernimmt diese die komplette Leistungsbereitstellung, weil diese Betriebskosten am geringsten sind. Die Speicher werden dann bis zur Ladeschlussgrenze über Rekuperation geladen. Ist die Grenze erreicht, kann keine weitere Leistung aufgenommen werden (Kapitel 7).

Durch das beschriebene Energiemanagement wird eine Flexibilität hinsichtlich der Anzahl und Ausprägung der verwendeten Komponenten, unter Berücksichtigung der vorgegebenen Gestaltungsrichtlinien für die Kosten-Leistungs-Funktionen und das Durchführen der beschriebenen Schritte in der Entscheidungslogik sichergestellt. Die Betriebskosten werden durch das flexible Energiemanagement quasistationär minimiert und sind geringer als beim regelbasierten Energiemanagement. Die Einbeziehung von Betriebskosten für dynamische Effekte und zur Vermeidung des Flatterns der Leistungsvorgaben wurde diskutiert. Zudem wurden erste Ideen zur Ermöglichung des Abschaltens von Quellen diskutiert, die als Senke beim Startvorgang wirken. Das flexible Energiemanagement stellt eine Energiebilanz auch bei mehreren Energieknotenpunkten sicher. Ein großer Vorteil des beschriebenen Verfahrens ist es, dass ein minimaler Datenaustausch stattfindet und der Rechenaufwand gegenüber anderen optimierenden Verfahren gering ist. Zudem wird durch die Gestaltung der Kosten-Leistungs-Funktionen sichergestellt, dass, soweit es

durch die Auslegung des Fahrzeugs möglich ist, sicherheitskritische Verbraucher versorgt werden und der Fahrerwunsch umgesetzt wird. Zusätzlich werden die Leistungsgrenzen der Energiekomponenten sichergestellt (Kapitel 8). Zusammenfassend kann aufgrund der Erfüllung der aufgestellten Anforderungen die wissenschaftliche Fragestellung, ob ein marktbasierter Ansatz für ein flexibles Energiemanagement geeignet ist, bejaht werden.

Beim flexiblen Energiemanagement handelt es sich um eine lokale Optimierung. Weiteres Verbesserungspotenzial hinsichtlich der Betriebskosten liegt vor, wenn prädiktive Daten zusätzlich vorliegen und mitberücksichtigt werden können. Somit könnte bspw. die Entscheidung, ob ein Speicher als Quelle oder Senke dienen soll, von einer zukünftigen Leistungsbereitstellung durch Rekuperation abhängig gemacht werden. So könnte sichergestellt werden, dass möglichst viel rekuperierbare und somit kostenlose Leistung aufgenommen werden kann. In dem Fall könnte bei der Fahrt an der Oberleitung (Kapitel 7.3) der Speicher als Quelle eingesetzt werden, damit anschließend wieder mehr kostenlose Rekuperationsenergie aufgenommen werden kann. Befindet sich das Fahrzeug auf einer Straße, bei der ein Gefälle in Kürze folgt, könnte ebenfalls der Speicher als Quelle eingesetzt werden, um beim Bremsen bergab mehr Rekuperationsleistung aufzunehmen. Des Weiteren kann der Speicher auch in Abhängigkeit des Weges, bspw. bei Bussen kurz vor der Haltestelle als Quelle eingesetzt werden, weil davon auszugehen ist, dass bald gebremst wird und dann möglichst viel Leistung aufgenommen werden soll.

Das Prinzip des flexiblen Energiemanagements kann zudem auch auf weitere Energiesysteme angewendet werden, so z.B. in einem Stromnetz mit stationären Speichern, die das Netz stabilisieren. Die Kosten-Leistungs-Funktionen der Batterien können wiederverwendet werden.

Bei der Auslegung der Energiekomponenten eines Fahrzeugs muss sichergestellt werden, dass die Leistungsaufnahme- und -abgabefähigkeit der Quellen und Senken aufeinander abgestimmt ist. Zudem sollte bei der Auslegung der Energiekomponenten die Häufigkeit der Betriebspunkte im späteren Einsatz bekannt sein, um optimale Komponenten für die Betriebsfälle einzusetzen. Das flexible Energiemanagement könnte in der Auslegungsphase eingesetzt werden. Mit Hilfe des Energiemanagements kann für verschiedene Zusammenstellungen von Energiekomponenten das Lastenprofil der einzelnen Komponenten, das entstehen würde, wenn die geringsten Betriebskosten mit den ausgewählten Komponenten erzeugt werden, für verschiedene Auslegungsfahrzyklen gegenübergestellt und bewertet werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Betriebskostenstruktur eines 40t Lkw mit Emissionsklasse Euro 5 ohne Maut	2
Abbildung 1.2:	Kraftstoffeinsparpotential über Hybridsystemkosten bei Nutzfahrzeugen.....	5
Abbildung 2.1:	Energieflüsse im Hybridfahrzeug mit einem Kraftstofftank und einer Batterie als Energiequelle.....	8
Abbildung 2.2:	Betriebsmodi im seriellen Hybrid	9
Abbildung 2.3:	Betriebsmodi im parallelen Hybrid	9
Abbildung 2.4:	Energieformen im seriellen Hybrid.....	11
Abbildung 2.5:	Energieformen im parallelen Hybrid	11
Abbildung 2.6:	Vorgehen dynamische Programmierung	14
Abbildung 2.7:	Zugehörigkeitsfunktionen und Regeln bei einer Fuzzy Logik Strategie.....	19
Abbildung 2.8:	Ableitung von Regeln zur Leistungsbereitstellung der Batterie in Abhängigkeit von der Gesamtantriebsleistung bei einem leistungsverzweigten Hybrid aus der dynamischen Programmierung .	21
Abbildung 2.9:	Angebots- und Nachfragefunktionen für Leistung in einem Berechnungsschritt zu Preisen	23
Abbildung 2.10:	Ermittlung des Marktpreises	24
Abbildung 2.11:	Kosten-Leistungs-Funktionen.....	25
Abbildung 3.1:	Vorgehen der Arbeit mit Kapitelangaben K1-K8	30
Abbildung 3.2:	Vergleich des flexiblen Energiemanagements mit einem regelbasiertem Energiemanagement.....	31
Abbildung 4.1:	Anforderungen an das flexible Energiemanagement	33
Abbildung 5.1:	Zwei Ebenen-Prinzip des flexiblen Energiemanagement.....	35
Abbildung 5.2:	Entscheidungslogik des flexiblen Energiemanagements, wenn monoton steigende Funktionen (Leistung über Kosten/Leistung) für die Quellen und Senken aufgestellt werden könnten	36
Abbildung 5.3:	Summierte Quellenfunktion mit Kostenvektor und Zugehörigkeitsmatrix zu den Quellen A, B und C im einfachsten Fall.	37
Abbildung 5.4:	Summierte Quellenfunktion mit Kostenvektor und Zugehörigkeitsmatrix zu den Quellen A, B und C mit mehr Berechnungsaufwand.....	38
Abbildung 5.5:	Entscheidungslogik des flexiblen Energiemanagements, wenn monoton steigende Kosten-Leistungs-Funktionen für die Quellen und Senken aufgestellt werden und vorab eine summierte Summenfunktion mit Zugehörigkeitsvektor aufgestellt wird	38

Abbildung 5.6:	Hierarchischer Energiemanagementaufbau bei einem seriellen Hybrid.....	40
Abbildung 5.7:	Energiekomponenten im ENUBA Lkw	41
Abbildung 5.8:	Summenfunktionen ohne Begrenzung (oben) und mit Begrenzung (unten) der Kosten-Leistungs-Funktion der Senke (links) und der Quelle (rechts).....	42
Abbildung 5.9:	Begrenzung der Kosten-Leistungs-Funktionen durch Betriebsgrenzen bei Quellen (links) und Senken (rechts)	43
Abbildung 5.10:	Kosten-Leistungs-Funktion der Motor-Generator-Einheit als Quelle unter Berücksichtigung der Kraftstoff- und Wartungskosten	45
Abbildung 5.11:	Kosten-Leistungs-Funktion des externen Netzes als Quelle.....	46
Abbildung 5.12:	Kosten-Leistungs-Funktion der Batterie mit den Einkaufskosten beim Laden über das externe Netz, den Kosten für den alterungsbedingten Austausch nach 3600 Zyklen bei einer Leistungsgrenze von 200 kW und den Gesamtkosten als Summe der Lade- und Alterungskosten	51
Abbildung 5.13:	Kosten-Leistungs-Funktion der Ultracaps mit den Einkaufskosten beim Laden, den Kosten für den alterungsbedingten Austausch bei einer Leistungsgrenze von 88 kW und den Gesamtkosten.....	53
Abbildung 5.14:	Vergleich von Kosten-Leistungs-Funktionen mit unterschiedlichen Prioritätsklassen.....	54
Abbildung 5.15:	Bestimmung der Kosten für Prioritätsklasse 1, damit diese die maximale Leistung der Quellen aufnehmen können und weitere Senken nur bei niedrigeren Kosten Leistung beziehen (links) und sonst keine Leistung beziehen (rechts)	55
Abbildung 5.16:	Kosten-Leistungs-Funktion der Traktion als Senke, wenn der umgerechnete Fahrerwunsch 107 kW beträgt und die minimalen Kosten für die maximal bereitstellbare Leistung der Summe der Quellen 0,024 €.....	56
Abbildung 5.17:	Kosten-Leistungs-Funktion der Traktion mit Boost-Funktion.....	56
Abbildung 5.18:	Kosten-Leistungs-Funktion der Nebenverbraucher, wenn der aktuelle Bedarf 600 W ist und alle Nebenverbraucher die Prioritätsklasse 1 besitzen und die Kosten für die maximal bereitstellbare Leistung der Summe der Quellen 0,024 € beträgt	58
Abbildung 5.19:	Kosten-Leistungs-Funktion der Nebenverbraucher bei verschiedenen Prioritätsklassen.....	59
Abbildung 5.20:	Kosten-Leistungs-Funktionen des elektrischen Speichers in Abhängigkeit vom Ladezustand.....	60
Abbildung 5.21:	Kosten-Leistungs-Funktion der Batterie als Senke für verschiedene Ladezustände und die sich ergebenden Leistungsgrenzen	61
Abbildung 5.22:	Kosten-Leistungs-Funktion der Ultracaps als Senke für verschiedene Ladezustände und die sich ergebenden Leistungsgrenzen.....	62

Abbildung 5.23:	Kosten-Leistungs-Funktionen der Ultracaps als Quelle und als Senke bei einem Ladezustand von 50 %, sowie die Addition beider Funktionen	63
Abbildung 5.24:	Kosten-Leistungs-Funktionen der Energiekomponenten und die entstehende Summenfunktion unter Berücksichtigung der Kosten-Leistungs-Funktion des Ultracapsystems als Senke (links) und als Quelle (rechts).....	63
Abbildung 5.25:	Entscheidungsablauf zur Festlegung eines Speichers als Quelle oder als Senke	65
Abbildung 5.26:	Gewichtsfaktor für den Ladezustand für die Ultracaps des ENUBA Lkw und die Batterie des Innotrucks	65
Abbildung 6.1:	Aufbau des modularen Hybridfahrzeugmodells	67
Abbildung 6.2:	Signalflüsse im Traktionsmodell und zwischen Traktion, Fahrer und Energiemanagement zur Traktion	70
Abbildung 6.3:	Ersatzschaltkreismodell der Ultracaps	73
Abbildung 6.4:	Batteriemoell mit einem elektrischen Modell und einem Alterungsmodell	74
Abbildung 6.5:	Schematischer Aufbau zur Traktion beim ENUBA Lkw.....	76
Abbildung 6.6:	Wirkungsgrad des Traktionsmotors für verschiedene prozentuale Anteile an der maximalen mechanischen Leistung der Elektromaschine und bei verschiedenen Drehzahlen	76
Abbildung 6.7:	Zusammenhang Bremspedalstellung und Bremskraft	77
Abbildung 6.8:	Luft- und Rollwiderstand des ENUBA Lkw mit Stromabnehmer an der Oberleitung in Abhängigkeit der relativen Geschwindigkeit zwischen Fahrzeug (über eine Kreisplattform gemessen) und Wind (in Fahrtrichtung anteilige Windgeschwindigkeit)	79
Abbildung 6.9:	Innenwiderstand des Batteriepacks beim Laden und Entladen in Abhängigkeit des Ladezustands bei 25°C	80
Abbildung 6.10:	Ruhe Spannungskennlinie des Batteriepacks in Abhängigkeit des Ladezustands bei 25°C	81
Abbildung 6.11:	Kraftstoffverbrauch der Motor-Generator-Einheit in der Messung und der Simulation bei gleichen Leistungsanforderungen für die Messfahrt Berlin	82
Abbildung 6.12:	Fahrzeuggeschwindigkeit durch das Traktionssystem in der Messung und der Simulation bei gleichen Eingangsdaten für die Messfahrt Berlin	83
Abbildung 6.13:	Ladezustand des Ultracapsystems in der Messung und der Simulation bei gleichen Leistungsanforderungen für die Messfahrt Berlin.....	83
Abbildung 7.1:	Leistungsverlauf der Nebenverbraucher beim regelbasierten Energiemanagement im Realfahrzeug und beim flexiblen Energiemanagement in der Simulation für die ersten 250 s der Messfahrt	85

Abbildung 7.2:	Leistungsverlauf der Traktion beim regelbasierten Energiemanagement im Realfahrzeug und beim flexiblen Energiemanagement in der Simulation für die ersten 250 s der Messfahrt	85
Abbildung 7.3:	Leistungsverlauf der Motor-Generator-Einheit beim regelbasierten und flexiblen Energiemanagement für die ersten 500 s der Messfahrt	86
Abbildung 7.4:	Leistungsverlauf der Ultracaps beim regelbasierten und flexiblen Energiemanagement in den ersten 250s der Messfahrt	87
Abbildung 7.5:	Ladezustandsverlauf der Ultracaps beim regelbasierten und flexiblen Energiemanagement während der gesamten Messfahrt.....	88
Abbildung 7.6:	Vergleich der kumulierten Kosten der Energiemanagementverfahren von der Motor-Generator-Einheit während der gesamten Messfahrt	89
Abbildung 7.7:	Vergleich der kumulierten Kosten der Energiemanagementverfahren von den Ultracaps während der gesamten Messfahrt.....	89
Abbildung 7.8:	Leistungsbereitstellung der Motor-Generator-Einheit beim flexiblen Energiemanagement mit einer Antriebsstrangvariante mit Batterie (Innotruck) und mit Ultracaps (ENUBA Lkw).....	91
Abbildung 7.9:	Leistungsbereitstellung des elektrischen Speichers beim flexiblen Energiemanagement mit einer Antriebsstrangvariante mit Batterie (Innotruck) und mit Ultracaps (ENUBA Lkw).....	91
Abbildung 7.10:	Ladezustand der elektrischen Speicher beim flexiblen Energiemanagement mit einer Antriebsstrangvariante mit Batterie (Innotruck) und mit Ultracaps (ENUBA Lkw).....	92
Abbildung 8.1:	Schritte des flexiblen Energiemanagements.....	96
Abbildung 8.2:	Einfluss der Diskretisierungsstufen auf die Energiebilanz.....	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Vergleich der Energiemanagementverfahren	28
Tabelle 5.1:	Prioritätsklassen der Senken	54
Tabelle 5.2:	Klassifizierung der Nebenverbraucher nach Funktionspriorität	57
Tabelle 6.1:	Ermittelte Parameter zum Modell der Motor-Generator-Einheit des ENUBA Lkw	75
Tabelle 6.2:	Ermittelte Parameter zum Traktionsmodell des ENUBA Lkw	79
Tabelle 6.3:	Ermittelte Parameter zum Ultracapmodell des ENUBA Lkw	80
Tabelle 7.1:	Mittelwert und Standardabweichung der Leistungsforderung von der Motor-Generator-Einheit entsprechend der unterschiedlichen Energiemanagementverfahren	86
Tabelle 7.2:	Mittelwert und Standardabweichung der Leistungsforderung von den Ultracaps entsprechend der unterschiedlichen Energiemanagementverfahren in kW	87
Tabelle 7.3:	Mittelwert und Standardabweichung der Leistungsforderung vom Bremswiderstand und der Motorbremse entsprechend der unterschiedlichen Energiemanagementverfahren	88
Tabelle 7.4:	Betriebskosten der Messfahrt beim flexiblen und regelbasierten Energiemanagement	90
Tabelle 7.5:	Betriebskosten der Messfahrt beim flexiblen Energiemanagement im ENUBA Lkw und Innotruck	92
Tabelle 7.6:	Betriebskosten der Messfahrt beim flexiblen Energiemanagement im ENUBA Lkw ohne und mit Oberleitung	93
Tabelle 7.7:	Betriebskosten der Messfahrt beim flexiblen Energiemanagement im Innotruck ohne und mit Oberleitung	94
Tabelle 8.1:	Zusammenfassung der Diskussion zu den Hauptanforderungen	99
Tabelle 8.2:	Zusammenfassung der Diskussion zu den Anforderungen auf Gesamtfahrzeugebene	101
Tabelle 8.3:	Zusammenfassung der Diskussion zu den Anforderungen auf Komponentenebene	103

Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
α	[]	Steigungswinkel
η_G	[]	Wirkungsgrad des Getriebes
η_{GEN}	[]	Wirkungsgrad des Generators
$\eta_{Inverter}$	[]	Wirkungsgrad des Inverters
η_{Achse}	[]	Wirkungsgrad der Antriebsachse
Θ_{red}	[kg/m ²]	reduzierte Trägheitsmoment der rotierenden Teile
Θ_n	[kg/m ²]	Trägheitsmoment der rotierenden Teile
$\Theta_{Räder}$	[kg/m ²]	Trägheitsmomenten der Räder
λ	[]	Drehmassenzuschlagsfaktor
μ	[]	Kraftschlussbeiwert
ρ_{Diesel}	[g/l]	Dichte von Diesel
ρ_{Luft}	[kg/m ³]	Dichte der Luft
ϕ	[]	Strafffunktion
a	[m/s ²]	Fahrzeugbeschleunigung
$\Delta Alterung_{Batt}$	[]	Anteil der Alterung bis zum Lebensdauerende der Batterie
$\Delta Alterung_{UC}$	[]	Anteil der Alterung bis zum Lebensdauerende der Ultracaps
A_{st}	[m ²]	Stirnfläche des Fahrzeugs
b_e	[g/kWh]	Spezifischer Kraftstoffverbrauch
c_{RR}	[]	Rollwiderstandsbeiwert
c_w	[]	Luftwiderstandsbeiwert
C_{Batt}	[Ah]	Kapazität der Batterie
$C_{Batt,0}$	[Ah]	Anfangskapazität der Batterie
C_{UC}	[Ah]	Kapazität der Ultracaps
$C_{zelle,Batt,0}$	[Ah]	Anfangskapazität einer Batteriezelle
ΔC_{Batt}	[Ah]	Kapazitätsverlust der Batterie
$\Delta C_{zelle,Batt}$	[Ah]	Kapazitätsänderung einer Batteriezelle
ΔDOD	[]	Zyklientiefe einer Batterie
$E_{Batt,0}$	[Wh]	Anfangsenergieinhalt einer Batterie
E_{UC}	[Wh]	Energieinhalt der Ultracaps

Verwendete Formelzeichen

$E_{UC,HZ}$	[Wh]	Entladeenergie der Ultracaps beim einem Halbzyklus
F_a	[N]	Beschleunigungswiderstand
F_{Brems}	[N]	Bremskraft
F_{Luft}	[N]	Luftwiderstand
F_N	[N]	Achslast
F_{Rad}	[N]	Kraft am Rad
F_{Roll}	[N]	Rollwiderstand
F_{Steig}	[N]	Steigungswiderstand
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
GF_{SOC}	[]	Ladezustandsabhängiger Gewichtungsfaktor
h	[m]	Höhe
HP_{Quelle}	[€]	Handelspreis mit dem Speicher als Quelle
HP_{Senke}	[€]	Handelspreis mit dem Speicher als Senke
ΔHP	[€]	Differenz der Handelspreise
i_{Achse}	[]	Antriebsachsenübersetzung
i_G	[]	Getriebeübersetzung
i_n	[]	Übersetzung der rotierenden Teile
I_{Batt}	[A]	Elektrischer Strom der Batterie
$I_{Batt,entladen,max}$	[A]	Maximaler Entladestrom einer Batterie
$I_{Batt,entladen,max,SOCmin}$	[A]	Maximaler Entladestrom einer Batterie aufgrund des Ladezustands
$I_{Batt,entladen,max,Umin}$	[A]	Maximaler Entladestrom einer Batterie aufgrund der Spannung
$I_{Batt,laden,max}$	[A]	Maximaler Ladestrom der Batterie
$I_{Batt,laden,max,SOCmin}$	[A]	Maximaler Ladestrom der Batterie aufgrund des Ladezustands
$I_{Batt,laden,max,Umin}$	[A]	Maximaler Ladestrom der Batterie aufgrund der Spannung
I_{UC}	[A]	Elektrischer Strom der Ultracaps
$I_{entladen,max,uc}$	[A]	Maximaler Entladestrom der Ultracaps
$I_{laden,max,uc}$	[A]	Maximaler Ladestrom der Ultracaps
J	[]	Gütefunktion
$K_{Austausch,Batt}$	[€/W]	Kosten für den Alterungsbedingten Austausch der Batterie
$K_{Austausch,UC}$	[€/W]	Kosten für den Austausch der Ultracaps

Verwendete Formelzeichen

K_{Batt}	[€]	Kosten für Leistung aus der Batterie
$K_{Batt,laden}$	[€/W]	Kosten zum Laden der Batterie
K_{Diesel}	[€/l]	Dieselpreis
$K_{Einkauf,Batt}$	[€/W]	Einkaufskosten der Batterie
$K_{Einkauf,UC}$	[€/W]	Einkaufskosten der Ultracaps
K_{EN}	[€]	Kosten für Leistung aus dem externen Netz
K_{MGE}	[€]	Kosten der Motor-Generator-Einheit
K_{Strom}	[€/W]	Elektrischer Energiepreis
K_{UC}	[€]	Kosten für Leistung aus den Ultracaps
$K_{UC,laden}$	[€/W]	Kosten zum Laden der Ultracaps
$K_{Wartung}$	[€]	Wartungskosten der Motor-Generator-Einheit für einen Berechnungszeitschritt
L	[]	Instantane Gütefunktion
\dot{m}_{Diesel}	[l/s]	Dieselmassenstrom
m_{Fzg}	[kg]	Fahrzeugmasse
M_{EM}	[Nm]	Moment der Elektromaschine
M_{GEN}	[Nm]	Moment des Generators
$M_{Rad,EM}$	[Nm]	durch die Elektromaschine verursachtes Moment am Rad
M_{VBM}	[Nm]	Moment des Verbrennungsmotors
n_{EM}	[1/s]	Drehzahl der Elektromaschine
n_{GEN}	[1/s]	Drehzahl des Generators
n_{Rad}	[1/s]	Drehzahl des Rads
n_{VBM}	[1/s]	Drehzahl des Verbrennungsmotors
N_Q	[]	Anzahl der steuerbaren Quellen
N_{Reifen}	[]	Anzahl der Reifen
N_S	[]	Anzahl der steuerbaren Senken
N_u	[]	Anzahl der Steuerungsparameter des Energiemanagements
$N_{Zyklen,batt}$	[]	Anzahl an Vollzyklen einer Batterie bis zum Lebensdauerende
$N_{Zyklen,UC}$	[]	Anzahl an Vollzyklen der Ultracaps bis zum Lebensdauerende
P_{Batt}	[W]	Leistung der Batterie
$P_{Batt,entladen,max}$	[W]	Maximale Entladeleistung der Batterie
$P_{Batt,laden}$	[W]	Ladeleistung der Batterie

Verwendete Formelzeichen

$P_{Batt,laden,max}$	[W]	Maximale Ladeleistung der Batterie
$P_{el,GEN}$	[W]	Elektrische Leistung des Generators
P_{EN}	[W]	Leistung aus dem externen Netz
P_{MGE}	[W]	Leistung der Motor-Generator-Einheit
P_{UC}	[W]	Leistung der Ultracaps
$P_{UC,entladen,max,I}$	[W]	Maximale Entladeleistung der Ultracaps aufgrund des Stroms
$P_{UC,entladen,max,U}$	[W]	Maximale Entladeleistung der Ultracaps aufgrund der Spannung
$P_{UC,laden}$	[W]	Ladeleistung der Ultracaps
$P_{UC,laden,max,I}$	[W]	Maximale Ladeleistung der Ultracaps aufgrund des Stroms
$P_{UC,laden,max,U}$	[W]	Maximale Ladeleistung der Ultracaps aufgrund der Spannung
P_{VBM}	[W]	Leistung des Verbrennungsmotors
$Q_{Zelle,Batt}$	[Ah]	Ladungsdurchsatz einer Batteriezelle
$Q_{Zelle,batt,0,t}$	[Ah]	Ladungsdurchsatz einer Batteriezelle seit Lebensbeginn bis zum aktuellen Zeitpunkt
r_{dyn}	[m]	dynamischen Reifenradius
$R_{i,Batt}$	[ohm]	Innenwiderstand einer Batterie
s	[m]	Weg
SOC_{Batt}	[]	Batterieladezustand
$SOC_{Batt,0}$	[]	Initialer Ladezustand der Batterie
$SOC_{Batt,max}$	[]	Maximaler Ladezustand der Batterie
$SOC_{Batt,min}$	[]	Untere Ladezustandsgrenze der Batterie
t	[s]	Zeit
$\Delta t_{Berechnung}$	[s]	Berechnungsschrittweite
$u(t)$	[]	Steuerungswerte
U_{Batt}	[V]	Klemmspannung der Batterie
$U_{Batt,0}$	[V]	Ruhepotential einer Batterie
$U_{Batt,max}$	[V]	Ladeschlussgrenze der Batterie
$U_{Batt,min}$	[V]	Entladeschlussgrenze einer Batterie
U_{UC}	[V]	Klemmspannung der Ultracaps
$U_{UC,aktuell}$	[V]	Aktuelle Spannung der Ultracaps
$U_{UC,init}$	[V]	Initiale Klemmspannung der Ultracaps

Verwendete Formelzeichen

$U_{uc,max}$	[V]	Maximale Spannung der Ultracaps
$U_{uc,min}$	[V]	Minimale Spannung der Ultracaps
$U_{Nenn,UC}$	[V]	Nennspannung der Ultracaps
U_{Reifen}	[m]	Abrollumfang der Reifen
$\varnothing U_{zelle,batt}$	[V]	Mittlere Batteriezellenspannung
v_{Fzg}	[m/s]	Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_{Fzg,rel}$	[m/s]	relative Fahrzeuggeschwindigkeit
V_{Diesel}	[l]	Kraftstoffverbrauch
\dot{V}_{Diesel}	[l/s]	Dieselvolumenstrom
W_{Batt}	[Wh]	Energiedurchsatz einer Batterie
$x(t)$	[]	Zustandswerte
$\%Zyklus_{Batt}$	[]	Anteil an einem Vollzyklus von einer Batterie

Literaturverzeichnis

- [Ade09]: ADE, Michael: Ein Beitrag zu Modellierung des Antriebsstrangs von Hybrid-Elektrofahrzeugen. Technische Universität Darmstadt. Dissertation (2009)
- [Aka13]: Akasol GmbH: Berechnungen der Entwicklungsabteilung. 2013
- [Ale11]: Alexander Dennis: Enviro 350H Specification: Hybrid Single Deck Chassis. URL http://www.alexander-dennis.com/wp-content/uploads/2012/11/350h_spec_sheet_europe.pdf
- [Amb09]: AMBÜHL, Daniel: Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles. ETH Zürich. Dissertation (2009)
- [Ans14]: ANSAREY, Mehdi; SHARIAT PANAH, Masoud; ZIARATI, Hussein; MAHJOOB, Mohammad: Optimal energy management in a dual-storage fuel-cell hybrid vehicle using multi-dimensional dynamic programming. In: Journal of Power Sources 250 (2014), S. 359–371
- [Ars04]: ARSIE, I.; GRAZIOSI, M.; PIANESE, C.; RIZZO, G. ; SORRENTINO, M.: Optimization of Supervisory Control Strategy for Parallel Hybrid Vehicle with Provisional Load Estimate. In: Proceedings of 7th Int. Symp. Adv. Vehicle Control (AVEC), Arnhem, The Netherlands (2004)
- [Bac05]: BACK, Michael: Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen. Karlsruhe, Universität Karlsruhe. Dissertation (2005)
- [Bar04]: BARSALI, S. ; MIULLI, C. ; POSSENTI, A.: A Control Strategy to Minimize Fuel Consumption of Series Hybrid Electric Vehicles. In: IEEE Transactions on Energy Conversion 19 (2004), Nr. 1, S. 187–195
- [Bas11]: BASHASH, Saeid ; MOURA, Scott J. ; FORMAN, Joel C. ; FATHY, Hosam K.: Plug-in hybrid electric vehicle charge pattern optimization for energy cost and battery longevity. In: Journal of Power Sources 196 (2011), Nr. 1, S. 541–549
- [Bas14]: BASS, Kostyantyn ; FREDERSDORFF, Lars ; KLAGES, Bernd ; GUNDEL, Dieter: Tools for Optimizing Operating Strategies for Electrified Drive Concepts. In: 11th Symposium, February 18th and 19th, 2014, Stadthalle Braunschweig (Hrsg.): Hybrid and Electric Vehicles. neue Ausg. Braunschweig : ITS Niedersachsen, 2014, S. 375–390
- [Bat05]: BATHAEE, S.M.T ; GASTAJ, A. H. ; EMAMI, S. R. ; MOHAMMADIAN, M.: A Fuzzy-based Supervisory Robust Control For Parallel Hybrid Electric Vehicles. In: IEEE 2005 Vehicle Power and Propulsion, 2005, S. 694–700
- [Bau00]: BAUMANN, B. ; WASHINGTON, G. ; GLENN, B. ; RIZZONI, G.: Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics (2000), Vol 5, No 1, S. 58–72
- [Bel57]: BELLMAN, Richard: Dynamik programming. Princeton, New Jersey : Princeton University Press, 1957
- [Bia11]: BIANCHI, D. ; ROLANDO, L. ; SERRAO, L. ; ONORI, S. ; RIZZONI, G. ; AL-KHAYAT, N. ; HSIEH, T. ; KANG, P.: Layered control strategies for hybrid electric vehicles based on optimal control International Journal of Hybrid and Electric Vehicles 3 (2011), S. 1–29

- [Böc08]: BÖCKL, Michael: Adaptives und prädiktives Energiemanagement zur Verbesserung der Effizienz von Hybridfahrzeugen. Technische Universität Wien. Dissertation (2008)
- [Boh07]: BOHLEN, Oliver ; KOWAL, Julia ; Dirk Uwe Sauer: Ageing behaviour of electrochemical double layer capacitors. In: Journal of Power Sources 173 (2007), Nr. 1, S. 626–632
- [Bou11a]: BOURLOT, Sandrine ; BLANCHARD, Philippe ; ROBERT, Stéphanie: Investigation of aging mechanisms of high power Li-ion cells used for hybrid electric vehicles. In: Journal of Power Sources 196 (2011), Nr. 16, S. 6841–6846
- [Bou11b]: BOURLOT, Sandrine ; BLANCHARD, Philippe ; ROBERT, Stéphanie: Investigation of aging mechanisms of high power Li-ion cells used for hybrid electric vehicles. In: Journal of Power Sources 196 (2011), Nr. 16, S. 6841–6846
- [Bra00]: BRAHMA, A. ; GUEZENEC, Y. ; RIZZONI, Giorgio: Optimal energy management in series hybrid electric vehicles. In: IEEE Proceedings of American Control Conference (2000)
- [Bra05]: BRAESS, Hans H. ; SEIFFERT, Ulrich: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 4. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2005
- [Bra13]: BRAESS, Hans-Hermann ; SEIFFERT, Ulrich: Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik : Mit 50 Tabellen. 7., aktualisierte Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2013 (ATZ-MTZ-Fachbuch)
- [Bre12]: Breda Menarinibus: E-Vivacity.URL <http://www.bredamenarinibus.it/en/prodotto.php?cat=5&prd=62>, aufgerufen 08.2015
- [Bro05]: BROUSSELY, M. ; BIENSAN, Ph. ; BONHOMME, F. ; BLANCHARD, Ph. ; HERREYRE, S. ; NECHEV, K. ; STANIEWICZ, R. J.: Main aging mechanisms in Li ion batteries. In: Journal of Power Sources 146 (2005), 1-2, S. 90–96
- [Bub10]: BUBNA, Piyush ; BRUNNER, Doug ; GANGLOFF, John J. ; ADVANI, Suresh G. ; PRASAD, Ajay K.: Analysis, operation and maintenance of a fuel cell/battery series-hybrid bus for urban transit applications. In: Journal of Power Sources 195 (2010), Nr. 12, S. 3939–3949
- [Bub12]: BUBNA, Piyush ; ADVANI, Suresh G. ; PRASAD, Ajay K.: Integration of batteries with ultracapacitors for a fuel cell hybrid transit bus. In: Journal of Power Sources 199 (2012), S. 360–366
- [Büc07]: BÜCHNER, Stefan ; CHRIST, Thomas ; BISCHOF, Matthias ; BÄKER, Bernard: Entwicklung von Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen. In: SCHÖLLMANN, Matthias (Hrsg.): Energiemanagement und Bordnetze 2 : Innovative Ansätze für modernes Energiemanagement und zuverlässige Bordnetzarchitekturen. Renningen : expert-Verl, 2007, S. 53–71
- [Büc08]: Büchner: Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen. Technische Universität Dresden. Dissertation (2008 – Überprüfungsdatum 2013-01-25)
- [Bur10]: BURKE, Andrew: Ultracapacitor technologies and application in hybrid and electric vehicles. In: International Journal of Energy Research 34 (2010), Nr. 2, S. 133–151

- [Bur11]: BURKE, Andrew ; MILLER, Marshall: The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications. In: Journal of Power Sources 196 (2011), Nr. 1, S. 514–522
- [Bus11]: BUSCH, Rudolf: Elektrotechnik und Elektronik : Für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker; mit 136 Übungsaufg. mit Lösungen. 6. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2011 (Studium)
- [Bus12]: Busworld Newsletter: Busworld Turkey: Drew the Crowds. In: Busworld 07/2012 (2012), Nr. 44, S. 1–6
- [Cas11]: CASSEBAUM, Oliver: Approach to an Online-Optimized Operating Strategy with heuristic Prediction Integration. In: ITS Niedersachsen (Hrsg.): 8th Braunschweig Symposium Hybrid and Electric Vehicles. Braunschweig : ITS Niedersachsen, 2011, S. 200–217
- [Che05]: CHEN, Jyh-Shin ; SALMAN, M.: Learning Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles. In: IEEE 2005 Vehicle Power and Propulsion, 2005, S. 427–432
- [Chr06]: CHRIST, Thomas: Rekuperation in elektrischen Energiebordnetzen von Kraftfahrzeugen. Düsseldorf. Dissertation (2006)
- [Coi12]: COIMBRA E COSTA, Pedro Danilo Godinho Abrantes: Environmental and Economical Competitiveness of Battery Electric Vehicles in the Portuguese Market: exploring the potential economical advantages of “Vehicle-to-Grid” systems. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Dissertation (2012)
- [Con13]: Continental: Nutzfahrzeugreifen - Technischer Ratgeber
- [DAF10]: DAF: DAF LF Hybrid: Für einen umweltfreundlichen Verteilerverkehr. URL <http://www.greencarcongress.com/2010/09/daf-putting-lf-hybrid-truck-into-production-eaton-hybrid-system.html>
- [Dai13]: Daimler AG, Daimler Trucks: Herstellerangaben. 2013
- [Dai14]: Daimler AG, Daimler Trucks: interne Berechnungen der Entwicklung Außenplanetenachsen TP/ESR, Truck Product Engineering. 2014
- [Das12]: Das elektrische Fahrtenbuch: MAN Metropolis: Hybrid-LKW als Transportlösung? URL <http://adacemobility.wordpress.com/2012/07/23/man-metropolis-hybrid-lkw-als-transportlosung/>
- [Del04]: DELPRAT, S. ; LAUBER, J. ; GUERRA, T. M. ; RIMAUX, J.: Control of a Parallel Hybrid Powertrain: Optimal Control. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology 53 (2004), Nr. 3, S. 872–881
- [Die09]: Die Bundesregierung: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. URL http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/nationaler-entwicklungsplan-elektromobilitaet.pdf?__blob=publicationFile
- [Di10]: DI FILIPPI, A. ; STOCKAR, S. ; ONORI, S. ; CANOVA, M. ; GUEZENNEC, Y.: Model-based life estimation of Li-ion batteries in PHEVs using large scale vehicle simulations: An introductory study. In: IEEE 2010 Vehicle Power and Propulsion, 2010, S. 1–6

- [DIN14] DIN. Schutzrecht DIN EN 590:2013 + AC:2014: Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge –Dieselkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren
- [Dre12]: DRESSLER, Norbert ; GUNDERMANN, Sebastian ; PIETRAS, Frank ; NILSSON, Per M. ; WINTERHOFF, Marc: Impacting the commercial vehicle industry : Six megatrends reveal the opportunities and challenges that the future holds. In: Automotive Insights 2012 (2012), 02/2012, S. 10–19
- [Dub09]: DUBARRY, Matthieu ; LIAW, Bor Yann: Identify capacity fading mechanism in a commercial LiFePO₄ cell. In: Journal of Power Sources 194 (2009), Nr. 1, S. 541–549
- [Ebb12]: EBBESEN, Soren Bruhn: Optimal Sizing and Control of Hybrid-electric Vehicles. ETH Zürich. Dissertation (2012)
- [Eck14]: ECKER, Madeleine ; NIETO, Nerea ; KÄBITZ, Stefan ; SCHMALSTIEG, Johannes ; BLANKE, Holger ; WARNECKE, Alexander ; SAUER, Dirk Uwe: Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O₂-based 18650 lithium-ion batteries. In: Journal of Power Sources 248 (2014), S. 839–851
- [Egl11]: EGLSEER, Andreas ; ACKERL, Martin: Development of a control strategy for commercial vehicles. In: ITS Niedersachsen (Hrsg.): 8th Braunschweig Symposium Hybrid and Electric Vehicles. Braunschweig : ITS Niedersachsen, 2011, S. 133–145
- [Ehs05]: EHSANI, Mehrdad: Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles : Fundamentals, theory, and design. Boca Raton : CRC Press, 2005 (Power electronics and applications series)
- [Eic12]: EICK, Steven: Heavy Duty Diesel Truck and Bus Hybrid Powertrain Study. 2012
- [Elb14]: ELBERT, Philipp: noncausal and causal optimization strategies for hybrid electric vehicles. Dissertation (2014)
- [Eng09]: ENGSTLE, Armin: Energiemanagement in Hybridfahrzeugen. Technische Universität München. Dissertation (2009 – Überprüfungsdatum 2013-01-25)
- [Ese14]: ESEBECK, Götz von: E-Mobility in Commercial Vehicles- Evolution or Revolution? In: 11th Symposium, February 18th and 19th, 2014, Stadthalle Braunschweig (Hrsg.): Hybrid and Electric Vehicles. neue Ausg. Braunschweig : ITS Niedersachsen, 2014, S. 120–132
- [Eur14]: European Commission: Strategy for reducing Heavy-Duty Vehicles' fuel consumption and CO₂ emissions : Communication from the commission to the council and the european parliament 21.5.2014 (2014)
- [Eva12]: EVANGELOU, Simos ; SHUKLA, Amit: Advances in the modelling and control of series hybrid electric vehicles. In: American Control Conference 2012, 2012
- [Fab06]: FABIS, Randomir: Beitrag zum Energiemanagement in Kfz-Bordnetzen. Technischen Universität Berlin. Dissertation (2006)
- [Fad11]: FADEL, Ahmad ; ZHOU, Biao: An experimental and analytical comparison study of power management methodologies of fuel cell–battery hybrid vehicles. In: Journal of Power Sources 196 (2011), Nr. 6, S. 3271–3279

- [Far05]: FARROKHI, M. ; MOHEBBI, M.: Optimal Fuzzy Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles. In: ICCAS 2005, 2005
- [Fle10]: FLECKENSTEIN, Matthias: Thermomanagement von Li-Ionen-Zellen aus Sicht der Energiespeicher-Entwicklung für Elektrofahrzeuge im Überblick. In: BÄKER, Bernard (Hrsg.): Moderne Elektronik im Kraftfahrzeug : Mit 10 Tabellen. Renningen : Expert-Verl., 2010, S. 121–143
- [Fle12]: FLECKENSTEIN, Matthias ; BOHLEN, Oliver ; BÄKER, Bernard: Aging Effect of Temperature Gradients in Li-ion Cells. In: Electric Vehicle Symposium 26, 2012
- [Fu11]: FU, Lina ; OZGUNER, Umit ; TULPULE, Pinak ; MARANO, Vincenzo: Real-time energy management and sensitivity study for hybrid electric vehicles. In: American Control Conference 2011, 2011, S. 2113–2118
- [Fuc14]: FUCHS, S.: Optimization of Life Cycle Costs for Hybrid Vehicles. In: 11th Symposium, February 18th and 19th, 2014, Stadthalle Braunschweig (Hrsg.): Hybrid and Electric Vehicles. neue Ausg. Braunschweig : ITS Niedersachsen, 2014, S. 171–187
- [Fug09]: FUGEL, Markus: Parallele Hybridantriebe im Kundenbetrieb. TU Braunschweig. Dissertation (2009)
- [Gal14]: GALLO, Jean-Baptiste ; TOMIC, Jasna ; BLOCH-RUBIN, Ted: Peak Demand Charges and Electric Transit Buses. 2014
- [Gis14]: Gisler: Electro Mobility for City Busses. In: 11th Symposium, February 18th and 19th, 2014, Stadthalle Braunschweig (Hrsg.): Hybrid and Electric Vehicles. neue Ausg. Braunschweig : ITS Niedersachsen, 2014, S. 133–147
- [Gla08]: GLAVIN, M. E. ; CHAN, Paul K.W. ; ARMSTRONG, S. ; HURLEY, W. G.: A stand-alone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system. In: 13th International Power Electronics 2008, 2008, S. 1688–1695
- [Göh97]: GÖHRING, Markus: Betriebsstrategien für serielle Hybridantriebe. RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrwesen. Dissertation (1997)
- [Gör12]: GÖRGLER, Jürgen: Elektromobilität: Die Spannung steigt. In: Busmagazine 09/2012 (2012), S. 8–15
- [Gra02]: GRAAF, Roger: Simulation hybrider Antriebskonzepte mit Kurzzeitspeicher für Kraftfahrzeuge. Aachen : Ika, 2002 (Schriftenreihe Automobiltechnik 60)
- [Gra04]: GRAF, Hans-Michael: Offene Softwarelösungen für das Energiemanagement. In: ATZ 2004 (2004), Nr. 01, S. 46–50
- [Gra13]: Grammer, R., Barth J.: Der neue Mercedes-Benz Atego Euro VI – Presse Information. Stuttgart, 2013
- [Grü12]: GRÜNYES, H. G. ; BIRKNER, M.: Electro mobility for heavy-duty vehicles. The Siemens eHighway system. In: 12th International Symposium on Heavy Vehicle Transportation Technology 2012, 2012
- [Gru10]: GRUNDHERR ALTENTHAN UND WEIYHERHAUS, Johannes von zu: Ableitung einer heuristischen Betriebsstrategie für ein Hybridfahrzeug aus einer Online-Optimierung. Technische Universität München. Dissertation (2010)

- [Haj07]: HAJIZADEH, Amin ; GOLKAR, Masoud Aliakbar: Intelligent power management strategy of hybrid distributed generation system. In: International Journal of Electrical Power & Energy Systems 29 (2007), Nr. 10, S. 783–795
- [Hak11]: HAKEN, Karl-Ludwig: Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik. 2. Aufl. München: Carl Hanser, 2011 (Fahrzeugtechnik)
- [Hal03]: HALFMANN, C.: Adaptive Modelle für die Kraftfahrzeugdynamik. Berlin : Springer, 2003 (VDI-Buch)
- [Hau12]: HAUSBERGER, S. ; KIES, A. ; LAINE, P. ; REXEIS, M. ; SAMARAS, Z. ; SANDSTRÖM-DAHL, C. ; SCHULTE, L. ; SILBERHOLZ, G. ; STEVEN, H. ; VERBEEK, R.: Reduction and Testing of Greenhouse Gas Emissions from Heavy Duty Vehicles : Development and testing of a certification procedure for CO2 emissions and fuel consumption of HDV. Final Report. 2012. – Final Report
- [Her10]: HERB, Frieder: Alterungsmechanismen in Lithium-Ionen-Batterien und PEM-Brennstoffzellen und deren Einfluss auf die Eigenschaften von daraus bestehenden Hybrid-Systemen. Ulm (2010)
- [Hil11]: HILL, Nikolas ; FINNEGAN, Stephen ; NORRIS, John ; BRANNIGAN, Charlotte ; WYNN, David ; BAKER, Hannah ; SKINNER, Ian: Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles – Lot 1: Strategy (2011)
- [Hoe13]: HOEPKE, E.: Nutzfahrzeugtechnik : Grundlagen, Systeme, Komponenten. 7., überarb. u. erw. Aufl. 2013. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2013
- [Hof07]: HOFMAN, Theo ; STEINBUCH, Maarten: Rule-based energy management strategies for hybrid vehicles. In: Int. J. Electric and Hybrid Vehicles (2007), Vol. 1, No. 1
- [Hof10]: HOFMANN, Peter: Hybridfahrzeuge : Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft. 1. Aufl. Wien : Springer Wien, 2010
- [Hyu11]: Hyundai: Hyundai continues its "Blue Drive" Push with CNG Hybrid Bus. URL http://worldwide.hyundai.com/WW/Corporate/News/News/DF_GT_GLOBALNEWS_249.html?selx2=
- [Ian14]: IANNELLI, Ralf: Bosch Product Portfolio for Hybrid vehicles Synergies between PC and CV. In: 11th Symposium, February 18th and 19th, 2014, Stadthalle Braunschweig (Hrsg.): Hybrid and Electric Vehicles. neue Ausg. Braunschweig : ITS Niedersachsen, 2014, S. 301–318
- [Ick07]: ICKERT, Lutz ; MATTHES, Ulrike ; ROMMERSKIRCHEN, Stefan ; WEYAND, Emely ; Schlesinger Michael ; LIMBERS, Jan: Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050 : Schlussbericht von ProgTrans AG im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2007)
- [Ise06]: ISERMANN, Rolf: Fahrdynamik-regelung : Modellbildung, fahrerassistenzsysteme, mechatronik. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2006
- [Jal97]: JALIL, N. ; KHEIR, N. A. ; SALMAN, M.: A rule-based energy management strategy for a series hybrid vehicle. In: American Control Conference 1997, 1997, S. 689-693 vol.1

- [Jeo12]: JEONG, Jongryeol ; SHIN, Changwoo ; LIM, Wonsik ; CHA, Suk Won ; JANG, Myeong Eon: Development of Backward Simulator based on Dynamic Programming for the Multiple Power Sources of Series hybrid Electric Vehicles. In: Electric Vehicle Symposium 26, 2012
- [Joh05]: JOHANNESSON, Lars ; ASBOGARD, Mattias ; EGARDT, Bo: Assessing the Potential of Predictive Control for Hybrid Vehicle Powertrains using Stochastic Dynamic Programming, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. In: IEEE 2005 8th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2005
- [Jör09]: JÖRG, Andreas: Optimale Auslegung und Betriebsführung von Hybridfahrzeugen. Technische Universität München. Dissertation (2009)
- [Jos06]: JOSSEN, Andreas ; WEYDANZ, Wolfgang: Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen : 36 Tabellen. 1. Aufl. Neusäß : Ubooks, 2006
- [Jur12]: JURIGA, John: Hyundai Motor Group's Development of the Fuel Cell Electric Vehicle. URL
http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac_may2012_hyundai.pdf
- [Käb13]: KÄBITZ, Stefan ; GERSCHLER, Jochen Bernhard ; ECKER, Madeleine ; YURDAGEL, Yusuf ; EMMERMACHER, Brita ; ANDRÉ, Dave ; MITSCH, Tim ; SAUER, Dirk Uwe: Cycle and calendar life study of a graphite Li-Ni_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O₂ Li-ion high energy system. Part A: Full cell characterization. In: Journal of Power Sources 239 (2013), S. 572–583
- [Kel08]: Kelp: Truck Customer 2008 : LKW- Kunden achten vor allem auf die Betriebskosten. Oliver Wymann Befragung (2008)
- [Kes07]: KESSELS, Johannes: Energy Management for Automotive Power Nets. Technische Universiteit Eindhoven. Dissertation (2007)
- [Kes08]: KESSELS, J.T.B.A. ; KOOT, M.W.T. ; van den Bosch, P.P.J. ; KOK, D. B.: Online Energy Management for Hybrid Electric Vehicles. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology 57 (2008), Nr. 6, S. 3428–3440
- [Kha08]: KHAYYAM, Hamid ; KOUZANI, Abbas Z. ; HU, Eric J.: An intelligent energy management model for a parallel hybrid vehicle under combined loads. In: IEEE 2008 International Conference on Vehicular Electronics and Safety, 2008, S. 145–150
- [Kha10]: KHAYYAM, Hamid ; KOUZANI, Abbas ; NAHAVANDI, Saeid ; MARANO, Vincenzo ; RIZZONI, Giorgio: Intelligent Energy Management in Hybrid Electric Vehicles. In: MACIA, Francisco (Hrsg.): Energy Management : InTech, 2010
- [Kle03]: KLEIMAIER, Alexander: Optimale Betriebsführung von Hybridfahrzeugen. Technische Universität München. Dissertation (2003)
- [Kle11]: KLEMENT, Werner: Fahrzeuggetriebe. 3. Aufl. München : Hanser, Carl, 2011 (Fahrzeugtechnik)
- [Koc14]: KOCHHAN, Robert ; FUCHS, Stephan ; REUTER, Benjamin ; BURDA, Peter ; MATZ, Stephan ; LIENKAMP, Markus: An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels and Greenhouse Gas Emissions. www.researchgate.net, 2014

- [Kok06]: KOK, D. ; PLOUMEN, S. ; SPIJKER, E. ; Karden E.: Strategien zum Energiemanagement in Hybridfahrzeugen. In: NAUNIN, Dietrich (Hrsg.): Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge : Technik, Strukturen und Entwicklungen ; mit 8 Tabellen. 4. Aufl. Renningen : Expert-Verl., 2006, S. 89–103
- [Koo04]: KOOT, Michiel ; KESSELS, J. ; JAGER, B. de ; HEEMELS, M. ; van den Bosch, Paul: Energy management strategies for vehicle power nets -. In: American Control Conference 2004, 2004, S. 4072–4077
- [Koo05]: KOOT, M. ; KESSELS, J.T.B.A. ; DEJAGER, B. ; HEEMELS, W.P.M.H. ; VANDENBOSCH, P.P.J. ; STEINBUCH, M.: Energy Management Strategies for Vehicular Electric Power Systems, Bd. 54. In: IEEE 2005 Transactions on Vehicular Technology, 2005, S. 771–782
- [Koo06]: KOOT, Michiel ; KESSELS, John ; JAGER, Bram de ; van den Bosch, Paul: Fuel reduction potential of energy management for vehicular electric power systems. In: International Journal of Alternative Propulsion (2006), Vol. 1, No. 1, S. 112–131
- [Kop08]: KOPRUBASI, Kerem: Modeling and Control of a hybrid-electric vehicle for drivability and fuel economy improvements. Ohio State University. Dissertation (2008)
- [Kra11]: KRAL, Ch. ; SIMIC, D.: Simulation von Elektrofahrzeugen. In: e & i Elektrotechnik und Informationstechnik 128 (2011), 1-2, S. 28–35
- [Küh10]: KÜHNE, Reinhart: Electric buses – An energy efficient urban transportation means. In: Energy 35 (2010), Nr. 12, S. 4510–4513
- [Laj10]: LAJUNEN, Antti: Evaluation of the benefits of using dual-source energy storage in hybrid electric vehicles. In: IEEE 2010 Vehicle Power and Propulsion, 2010, S. 1–6
- [Laj11]: LAJUNEN, Antti: Evaluation of energy storage system requirements for hybrid mining loader. In: IEEE 2011 Vehicle Power and Propulsion, 2011, S. 1–6
- [Laj12a]: LAJUNEN, Antti: Development of energy management strategy for plug-in hybrid city bus. In: IEEE 2012 Transportation Electrification Conference and Expo, 2012, S. 1–6
- [Laj12b]: LAJUNEN, Antti: Powertrain design alternatives for electric city bus. In: IEEE 2012 International Electric Vehicle Conference, 2012, S. 1112–1117
- [Laj13a]: LAJUNEN, Antti: Energy-optimal velocity profiles for electric city buses. In: IEEE 2013 International Conference on Automotive Science and Engineering, 2013, S. 886–891
- [Laj13b]: LAJUNEN, Antti: Development of Energy Management Strategies for Heavy Mobile Machinery. In: ASME Dynamic Systems and Control Conference 2013, 2013, S. V001T14A004
- [Laj14a]: LAJUNEN, Antti: Improving the Energy Efficiency and Operating Performance of Heavy Vehicles by Powertrain Electrification. Aalto University. Dissertation (2014)

- [Laj14b]: LAJUNEN, Antti: Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies 38 (2014), S. 1–15
- [Laj14c]: LAJUNEN, Antti: Fuel economy analysis of conventional and hybrid heavy vehicle combinations over real-world operating routes. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment 31 (2014), S. 70–84
- [Lan05]: LANGARI, R. ; WON, J.-S.: Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle—Part I: System Architecture and Design of the Driving Situation Identification Process. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology 54 (2005), Nr. 3, S. 925–934
- [Lan07]: LANGE, Stephan: Energiemanagement in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Technischen Universität Braunschweig. Dissertation (2007)
- [Lar14]: Larsson: Route Optimized Energy Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicles. Chalmers University of Technology. Dissertation (2014)
- [Lep13]: M. Lepiorz, W. Weydanz und A. Jossen, „Ah-Throughput versus residual capacity method for prediction of capacity loss of Li-Ion batteries at alternating temperatures“, Kraftwerk Batterie 2013, Aachen, 2013
- [Lie12]: LIENKAMP, Markus: Elektromobilität : Hype oder Revolution? Berlin: Springer, 2012 (SpringerLink : Bücher)
- [Lin01a]: LIN, Chan-Chiao ; FILIPI, Zoran ; WANG, Yongsheng ; LOUCA, Loucas ; PENG, Huei ; ASSANIS, Dennis ; STEIN, Jeffrey: Integrated, Feed-Forward Hybrid Electric Vehicle Simulation in SIMULINK and its Use for Power Management Studies. Warrendale, PA : SAE International, 2001
- [Lin01b]: LIN, Chan-Chiao ; KANG, Jun-Mo ; GRIZZLE, J. W. ; PENG, Huei: Energy management strategy for a parallel hybrid electric truck. In: American Control Conference 2001, 2001, S. 2878–2883
- [Lin03]: LIN, Chan-Chiao ; PENG, Huei ; GRIZZLE, J. W. ; KANG, Jun-Mo: Power management strategy for a parallel hybrid electric truck. In: IEEE Transactions on Control Systems Technology 11 (2003), Nr. 6, S. 839–849
- [Lin04]: LIN, Chan-Chiao ; PENG, Huei ; GRIZZLE, Jessy W.: A Stochastic Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles. In: American Control Conference 2004, 2004
- [Lin10]: LINDENMAIER, Jochen: Untersuchung eines von Doppelschichtkondensatoren unterstützten Zweispannungsnetztes für Mikro-Hybrid-Fahrzeuge. Universität Ulm. Dissertation (2010)
- [Lin11]: LINK, Jochen: Elektromobilität und erneuerbare Energien: Lokal optimierter Einsatz von netzgekoppelten Fahrzeugen. TU Dortmund. Dissertation (2011)
- [Lio15]: Liotech: Electric Bus Nefaz-52992. URL <http://www.liotech.ru/ennefaz>
- [Lun09]: LUNANOVA, Marco: Optimierung von Nebenaggregaten : Massnahmen zur Senkung der CO2-Emission von Kraftfahrzeugen. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009

- [Mar09]: MARANO, V. ; ONORI, S. ; GUEZENNEC, Y. ; RIZZONI, G. ; MADELLA, N.: Lithium-ion batteries life estimation for plug-in hybrid electric vehicles. In: IEEE 2009 Vehicle Power and Propulsion, 2009, S. 536–543
- [Mar14]: MARONGIU, Andrea ; ROSCHER, Marco ; SAUER, Dirk Uwe: Influence of the vehicle-to-grid strategy on the aging behavior of lithium battery electric vehicles. In: Applied Energy (2014)
- [Mau02]: MAUME, Christoph: Systemanalyse und Simulation eines Brennstoffzellen-Hybrid-Fahrzeugs mit autothermer Methanolreformierung. Technische Universität München. Dissertation (2002)
- [Max13]: Maxwell: Herstellerangaben zu den Ultracapmodulen im ENUBA LKW. 2013
- [Moh05]: MOHEBBI, M. ; CHARKHGARD, M. ; FARROKHI, M.: Optimal Neuro-Fuzzy Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles. In: IEEE 2005 Vehicle Power and Propulsion, 2005, S. 252–256
- [Moh07]: MOHEBBI, M. ; FARROKHI, M.: Adaptive neuro control of parallel hybrid electric vehicles. In: Int. J. Electric and Hybrid Vehicles, (2007), vol. 1
- [Mol09]: MOL, Carlo ; O’Keefe, Michael, Brouwer, Arie ; SUOMELA, Jussi: Trends and insight in heavy-duty vehicle electrification. In: World Electric Vehicle Journal 4 (2009), S. 307–318
- [Moh13]: MOHRMANN, Björn: Longitudinal Management for an Electric Vehicle. In: 22nd Aachner Kolloquium: Fahrzeug und Motorentechnik 2013, 2013
- [Mül02]: MÜLLER-KOSE, Jan-Peter: Repräsentative Lastkollektive für Fahrzeuggetriebe. Aachen : Shaker, 2002 (Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig 3)
- [Mus04]: MUSARDO, C. ; STACCIA, B. ; BITTANTI, S. ; GUEZENNEC, Y. ; GUZZELLA, L. ; RIZZONI, G.: An adaptive algorithm for hybrid electric vehicles energy management. In: FISITA 2004 World Automotive Congress, 2004
- [Mus05a]: MUSARDO, C. ; STACCIA, B. ; MIDLAM-MOHLER, S. ; GUEZENNEC, Y. ; RIZZONI, G.: Supervisory Control for NOx Reduction of an HEV with a Mixed-Mode HCCI/CIDI Engine. In: American Control Conference 2005, 2005, S. 3877–3881
- [Mus05b]: MUSARDO, Christian ; RIZZONI, Giorgio ; STACCIA, Benedetto: A-ECMS: An adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management, December 12-15, 2005. In: IEEE 2005 44th Conference on Decision Control, 2005
- [Nat04]: National Renewable Energy Laboratory: Indianapolis Public Transportation: Diesel Hybrid Electric Vehicles. URL <http://www.afdc.energy.gov/pdfs/36663.pdf>
- [Nau15]: NAUMAN, Sebastian ; VOGELPOHL, Hedwig: CACTUS Project: Models and Methods for the Evaluation and the optimal Application of Battery Charging and Switching Technologies for Electric Busses: Deliverable 1.2 Technologies for fully Electric Busses. 2015
- [Nis06]: Nissan Motor Co: Nissan releases Atlas 20 Hybrid truck in Japan. URL http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2006/_STORY/060517-01-e.html

- [Nis14]: NISSEN, Volker: Ausgewählte Grundlagen der Fuzzy Set Theorie. 2., korr. Aufl. Ilmenau : Universitätsbibliothek Ilmenau, 2014 (Ilmenauer Beiträge zur Wirtschaftsinformatik 2014-01)
- [Nov11]: NovaBus: Technical specifications. URL http://www.novabus.com/documents/Spec_Sheet_FINAL.pdf
- [Nui03]: NUIJTEN, E. ; KOOT, M. ; KESSELS, J. ; JAGER, B. de ; HEEMELS, M. ; HENDRIX, W. ; van den Bosch, Paul P. J.: Advanced energy management strategies for vehiclepower nets, Bd. 2003. In: EAEC 2003 9th Int. Congress: European Automotive Industry Driving Global Changes, 2003
- [Nyl12]: NYLUND, Nils-Olof ; KOPONEN, Kati: Fuel and technology alternatives for buses : Overall energy efficiency and emission performance, 2012 (VTT technology 46)
- [Omn11]: Omnibusspiegel: Dynamisch Sparen: Neue Entwicklung bei Hybridbussen. In: Omnibusspiegel 01/2011 (2011), S. 3–6
- [Omn12]: Omnibusspiegel: Neue Entwicklung bei Elektrobussen 11/2012 (2012), 12-9, S. 8–17
- [Ono10]: ONORI, Simona ; SERRAO, Lorenzo ; RIZZONI, Giorgio: Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy for Hybrid Electric Vehicles. In: ASME Dynamic Systems and Control Conference 2010, 2010
- [Ono11]: ONORI, Simona ; SERRAO, Lorenzo: On Adaptive-ECMS strategies for hybrid electric vehicles. In: Les Rencontres Scientifiques d'IFP Energies nouvelles – Int. Scient. Conf. on hybrid and electric vehicles – RHEVE, 2011
- [Opt15]: Optare Group Ltd: Versa - Style and comfort redefined. URL http://static1.squarespace.com/static/5318a7c0e4b03ba2018b69f4/t/53abd621e4b073e1bdede7ab/1403770401168/versa+brochure_spec.pdf
- [Pag00]: PAGANELLI, G. ; GUERRA, T. M. ; DELPRAT, S. ; SANTIN, J-J ; DELHOM, M. ; COMBES, E.: Simulation and assessment of power control strategies for a parallel hybrid car, Bd. 214. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2000, S. 705–717
- [Pag01]: PAGANELLI, G. ; TATENO, M. ; BRAHMA, A. ; RIZZONI, G. ; GUEZENNEC, Y.: Control development for a hybrid-electric sport-utility vehicle: strategy, implementation and field test results. In: American Control Conference 2001, 2001, S. 5064–5069
- [Pag02]: PAGANELLI, G. ; DELPRAT, S. ; GUERRA, T. M. ; RIMAU, J. ; SANTIN, J. J.: Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains. In: IEEE 2002 55th Vehicular Technology Conference, 2002, S. 2076–2081
- [Pal07]: PALADINI, Vanessa ; DONATEO, Teresa ; RISI, Arturo de ; LAFORGIA, Domenico: Super-capacitors fuel-cell hybrid electric vehicle optimization and control strategy development. In: Energy Conversion and Management 48 (2007), Nr. 11, S. 3001–3008
- [Pap06]: PAPAGEORGIOU, M.: Optimierung : Statische, dynamische, stochastische Verfahren. 3., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin : Springer, 2006

- [Pér06]: PÉREZ, Laura V. ; BOSSIO, Guillermo R. ; MOITRE, Diego ; GARCÍA, Guillermo O.: Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming. In: Mathematics and Computers in Simulation 73 (2006), 1-4, S. 244–254
- [Phi00]: PHILLIPS, A. M. ; JANKOVIC, M. ; BAILEY, K. E.: Vehicle system controller design for a hybrid electric vehicle. In: IEEE 2000 International Conference on Control Applications, 2000, S. 297–302
- [Pic01]: PICCOLO, A. ; IPPOLITO, L. ; ZO GALDI, V. ; VACCARO, A.: Optimisation of energy flow management in hybrid electric vehicles via genetic algorithms. In: IEEE/ASME 2001 International Conference on Advanced Intelligent Mechatronic, 2001, S. 434–439
- [Pis05a]: PISU, P. ; RIZZONI, G.: A Supervisory Control Strategy for Series Hybrid Electric Vehicles with Two Energy Storage Systems. In: IEEE 2005 Vehicle Power and Propulsion, 2005, S. 65–72
- [Pis05b]: PISU, Pierluigi ; KOPRUBASI, Kerem ; RIZZONI, Giorgio: Energy Management and Drivability Control Problems for Hybrid Electric Vehicles : P. Pisu, K. Koprubasi, and G. Rizzoni,. In: IEEE 2005 44thConference on Decision Control, 2005, S. 1824–1830
- [Pis07]: PISU, Pierluigi ; RIZZONI, Giorgio: A Comparative Study Of Supervisory Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles, Bd. 15. In: IEEE 2007 Transactions on Control Systems Technology, 2007, S. 506–518
- [Ple04]: PLETT, G. L.: High-Performance Battery-Pack Power Estimation Using a Dynamic Cell Model. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology 53 (2004), Nr. 5, S. 1586–1593
- [Pow11]: Power Vehicle Innovation: Alternative Energies Solutions for Industrial Vehicles: OEM - Electric drivelines. URL
<http://content.media.cebit.de/media/000141/0141992eng.pdf>
- [Pro12]: PROFF, Heike: Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität : Betriebswirtschaftliche und technische Aspekte. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2012
- [Rad13]: RADKE, Sabine (Hrsg.): Verkehr in Zahlen. 42. Jg. Hamburg : Dt. Verkehrs-Verl, 2013
- [Rei10a]: REIF, Konrad: Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe. In: Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe (2010)
- [Rei10b]: REIF, Konrad: Bremsen Und Bremsregelsysteme : Vieweg + Teubner Verlag, 2010
- [Rei12]: REIF, Konrad ; NOREIKAT, KarIE ; BORGEEEST, Kai: Kraftfahrzeug-Hybridantriebe : Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2012 (Atz/Mtz-Fachbuch)
- [Rei14]: REIF, Konrad: Automobilelektronik : Eine Einführung für Ingenieure. 5., überarb. Aufl. 2014. Wiesbaden, s.l. : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014 (ATZ / MTZ-Fachbuch)
- [Riz14]: RIZZONI, Giorgio ; ONORI, Simona: Energy Management of Hybrid Electric Vehicles: 15 Years of Development at the Ohio State University. In: Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles (2014)

- [Sal07]: SALMASI, Farzad Rajaei: Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends : VOL. 56, NO. 5,, Bd. 56. In: IEEE 2007 Transaction on Vehicular technology, 2007, S. 2393–2404
- [Sal00]: SALMAN, M. ; SCHOUTEN, N. J. ; KHEIR, N. A.: Control strategies for parallel hybrid vehicles. In: American Control Conference 2000, 2000, S. 524-528 vol.1
- [Sal05]: SALMAN, M. ; Chang M.-F. ; CHEN, J.-S.: Predictive Energy Management Strategies for Hybrid Vehicles. In: IEEE 2005 44thConference on Decision Control, 2005, S. 21–25
- [Sam13]: Sampathnarayanan: Analysis and Design of Stable and Optimal Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles. Dissertation (2013)
- [Sau07]: SAUER, Dirk Uwe ; BOHLEN, Oliver ; SANDERS, Tilman ; WAAG, Wladislaw; SCHMIDT, Rainer ; GERSCHLER, Jochen Bernhard: Batteriezustandserkennung: Mögliche Verfahren- und Alogirthmenansätze, Grenzen der Batteriezustandserkennung. In: SCHÖLLMANN, Matthias (Hrsg.): Energiemanagement und Bordnetze 2 : Innovative Ansätze für modernes Energiemanagement und zuverlässige Bordnetzarchitekturen. Renningen : expert-Verl, 2007, S. 1–30
- [Sch02]: SCHOUTEN, N. J. ; SALMAN, M. A. ; KHEIR, N. A.: Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles. In: IEEE Transactions on Control Systems Technology 10 (2002), Nr. 3, S. 460–468
- [Sch05]: SCHELL, Andreas ; PENG, Huei ; TRAN, Doanh ; STAMOS, Euthie ; LIN, Chan-Chiao ; KIM, Min Joong: Modelling and control strategy development for fuel cell electric vehicles. In: Annual Reviews in Control 29 (2005), Nr. 1, S. 159–168
- [Sch07]: SCHMIDT, Matthias: Ein neues Energiemanagement-Konzept für das elektrische Bordnetz. In: ATZ 2007 (2007), Nr. 01, S. 10–15
- [Sch09]: SCHMIDT, Matthias: Ein selbstadaptierender, dynamischer Energiemanagementansatz für das elektrische Krafffahrzeugbordnetz. Universität Kassel. Dissertation (2009)
- [Sch12]: SCHULZ, Sven ; Akasol GmbH: Hocheffiziente Lithium-Ionen-Batteriesysteme für Hybrid- und Vollelektrische Nutzfahrzeuge, Busse und Schienenfahrzeuge. 23.7.2012
- [Sch14a]: SCHMALSTIEG, Johannes ; KÄBITZ, Stefan ; ECKER, Madeleine ; SAUER, Dirk Uwe: A holistic aging model for Li(NiMnCo)O₂ based 18650 lithium-ion batteries. In: Journal of Power Sources 257 (2014), S. 325–334
- [Sch14b]: SCHRÖDER, Christian ; PETR, Philipp ; GRÄBER, Manuel ; TEGETHOFF, Wilhelm: Nonlinear Model Predictive Control for Thermal and Electric Power Management for Parallel Hybrid Electric Vehicles. In: 11th Symposium, February 18th and 19th, 2014, Stadthalle Braunschweig (Hrsg.): Hybrid and Electric Vehicles. neue Ausg. Braunschweig : ITS Niedersachsen, 2014, S. 319–341
- [Sch97]: SCHERER, Andreas: Neuronale Netze : Grundlagen und Anwendungen. Braunschweig [u.a.] : Vieweg, 1997 (Computational intelligence)

- [Sci04]: SCIARRETTA, A. ; BACK, M. ; GUZZELLA, L.: Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles. In: IEEE Transactions on Control Systems Technology 12 (2004), Nr. 3, S. 352–363
- [Sci07]: Sciarretta: Control of Hybrid Electric Vehicles. In: IEE Control Systems Magazine (2007), vol. 27, no 2, S. 60–70
- [Sei00]: SEILER, Jakob: Betriebsstrategien für Hybridfahrzeuge mit Verbrennungsmotor unter der Berücksichtigung von Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen während der Warmlaufphase. TU München. Dissertation (2000)
- [Sei14]: SEIBT, Fabian ; RUDORFF, Axel ; SCHMITZ, Holger ; LORENZ, Stefan: Scalable 48V Li-Ion Battery concept: markt requirements and solutions. In: 11th Symposium, February 18th and 19th, 2014, Stadthalle Braunschweig (Hrsg.): Hybrid and Electric Vehicles. neue Ausg. Braunschweig : ITS Niedersachsen, 2014, S. 251-259:
- [Ser08]: SERRAO, Lorenzo ; RIZZONI, Giorgio: Optimal Control of Power Split for a Hybrid Electric Refuse Vehicle. In: American Control Conference 2008, 2008
- [Ser09a]: SERRAO, Lorenzo: A comparative analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles. Ohio State University. Dissertation (2009)
- [Ser09b]: SERRAO, Lorenzo ; ONORI, Simona ; RIZZONI, Giorgio: ECMS As a Realization of Pontryagin's Minimum Principle for HEV Control. In: American Control Conference 2009, 2009
- [Sie11]: Siemens AG: Abschlussbericht zum Förderproject ENUBA: Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. 2011
- [Sie13]: Siemens AG, Industry Sector, Drive Technologies Division, Large Drives: Berechnungen der Konstruktionsabteilung. 2013
- [Sie14]: Siemens AG, Industry Sector, Drive Technologies Division, Large Drives: interne Untersuchungen. 2014
- [Spi02]: SPIEGELBERG, Gernot: Ein Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und Funktionalität von Fahrzeugen unter Einbindung des Antriebstrangmoduls MOTionX-ACT. 1. Aufl. Göttingen : Cuvillier, 2002
- [Spy00]: SPYKER, R. L. ; NELMS, R. M.: Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor. In: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 36 (2000), Nr. 3, S. 829–836
- [Ste12]: STEVIĆ, Zoran: New Generation of electric vehicles : InTech, 2012
- [Sti08]: STIEGELER, Markus: Entwurf einer vorausschauenden Betriebsstrategie für parallele hybride Antriebsstränge. Universität Ulm. Dissertation (2008)
- [Sto11]: STOCKAR, Stephanie ; MARANO, Vincenzo ; CANOVA, Marcello ; RIZZONI, Giorgio ; GUZZELLA, Lino: Energy-Optimal Control of Plug-in Hybrid Electric Vehicles for Real-World Driving Cycles. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology 60 (2011), Nr. 7, S. 2949–2962

- [Sun09]: SUNDSTRÖM, O. ; AMBÜHL, D. ; GUZZELLA, L.: On implementation of dynamic programming for optimal control problems with final state constraints. In: Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Institut français du pétrole (2009), Vol. 65 (2010), No. 1., S. 91–102
- [Tat08]: TATE, Edward Dean ; GRIZZLE, Jessy W. ; PENG, Huei: Shortest path stochastic control for hybrid electric vehicles. In: International Journal of Robust and Nonlinear Control 18 (2008), Nr. 14, S. 1409–1429
- [Tat13]: Tata Starbus: The wheels of a greener world now in India! URL <http://www.buses.tatamotors.com/products/pdf/starbus-cng-hybrid--22.pdf>
- [U.S10]: U.S. Department of Energy: Clean Cities Guide to Alternative Fuel and Advanced Medium- and Heavy-Duty Vehicles. 2010
- [van10]: van Vliet, Oscar P.R. ; KRUITHOF, Thomas ; TURKENBURG, Wim C. ; FAAIJ, André P.C.: Techno-economic comparison of series hybrid, plug-in hybrid, fuel cell and regular cars. In: Journal of Power Sources 195 (2010), Nr. 19, S. 6570–6585
- [van12]: VAN KEULEN, Thijs ; VAN MULLEM, Dominique ; JAGER, Bram de ; KESSELS, John T.B.A. ; STEINBUCH, Maarten: Design, implementation, and experimental validation of optimal power split control for hybrid electric trucks. In: Control Engineering Practice 20 (2012), Nr. 5, S. 547–558
- [Vie10]: VIEHMANN, Matthias: Störlichtbogenschutz in Elektrofahrzeugen durch neuartigen optisch-elektrischen Kombinationsleiter: Überwachungseinrichtung und Energiemanagementsystem. In: SCHÖLLMANN, Matthias (Hrsg.): Energiemanagement und Bordnetze 3. Innovative Ansätze für modernes Energiemanagement und zuverlässige Bordnetzarchitekturen : Mit 10 Tabellen. Renningen : Expert-Verl., 2010, S. 125–136
- [Wag04]: WAGENER, Andreas: Adaptives Energiemanagement für einen hybriden PKW mit dezentraler Reglerstruktur (2004)
- [Wal10]: WALLENTOWITZ, Henning ; FREIALDENHOVEN, Arndt ; OLSCHIEWSKI, Ingo: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges : Technologien, Märkte und Implikationen. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2010
- [Wil09]: WILDE, Andreas: Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen. Technische Universität München. Dissertation (2009)
- [Wit11]: WITTENBRINK, Paul: Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr : Grundlagen - Optimierungspotenziale - Green Logistic. 1. Aufl. Wiesbaden : Gabler, 2011
- [Wit12]: WITTENBRINK, Paul: Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr : Grundlagen - Optimierungspotenziale - Green Logistics. 2., Aufl. 2012. Wiesbaden : Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, 2012
- [Won05]: WON, J.-S. ; LANGARI, R.: Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle—Part II: Torque Distribution, Charge Sustainance Strategies, and Performance Results. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology 54 (2005), Nr. 3, S. 935–953

- [Xu10]: XU, Liangfei ; CAO, Guijun ; LI, Jianqiu ; YANG, Fuyuan ; LU, Languang ; OUYANG, Minggao: Equivalent Consumption Minimization Strategies of Series Hybrid City Buses. In: MACIA, Francisco (Hrsg.): Energy Management : InTech, 2010
- [Zen10]: ZENATI, A. ; DESPREZ, Ph. ; RAZIK, H.: Estimation of the SOC and the SOH of li-ion batteries, by combining impedance measurements with the fuzzy logic inference. In: IECON 2010 - 36th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2010, S. 1773–1778
- [Zhu06]: ZHU, Y. ; CHEN, Y. ; WU, Z. ; WANG, A.: Optimisation design of an energy management strategy for hybrid vehicles. In: International Journal of Alternative Propulsion (2006), Vol. 1, No. 1, S. 47–62

Verzeichnis studentischer Arbeiten

Während der Anfertigung dieser Dissertation entstanden unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung der Autorin die nachfolgend aufgeführten studentischen Arbeiten. Die entstandenen Ergebnisse sind teilweise in die vorliegende Arbeit eingeflossen. Vielen Dank an die Bearbeiterin und Bearbeiter für Ihre Unterstützung im Rahmen des Forschungsprojekts.

- [Fre13]: FREESE, Torsten: Auswahl von Komponenten und deren Integration in das Energiemanagement eines seriell hybriden Fahrzeugs. Masterarbeit (2013)
- [Gma15]: GMAR, Mohamed: *Untersuchungen zu Energiemanagementstrategien für Hybridfahrzeuge*. Technische Universität München. Masterarbeit (2015)
- [Här12]: HÄRINGER, Florian: Aufbau eines seriell hybriden Antriebsstrangmodells. Technische Universität München. Semesterarbeit (2012)
- [Hid14]: HIDALGO PONTET, Hector Ricardo: Development, Adjustment, Verification and Validation of the Flexible Energy Management Model for a Series Hybrid Truck. Technische Universität München. Masterarbeit (2014)
- [Kei13]: KEILEN, Fabian: Abbildung von Kosten durch Alterungseffekte bei Lithium-Ionen Batterien durch die Betriebsstrategie. Technische Universität München. Semesterarbeit (2013)
- [Muß13]: MUßNER, Helena Margarethe: Entwicklung und Verifikation einer Energiemanagement-Strategie für ein seriell hybrides Nutzfahrzeug. Technische Universität München. Diplomarbeit (2013)
- [Nie13]: NIEDERMEIER, Martin: Bestimmung von Fahrzeugparametern durch Messungen. Technische Universität München. Semesterarbeit (2013)
- [Nie14]: NIEDERMEIER, Martin: Recherche zu elektrischen Quellen und Senken bei hybriden und elektrischen Nutzfahrzeugen. Technische Universität München. Semesterarbeit (2014)
- [Rüt13]: RÜTER, Felix: Verifizierung eines hybriden Antriebsstrangmodells. Technische Universität München. Semesterarbeit (2013)
- [Ste11]: STERNISCHA, Simon: Package-Optimierung eines Lastkraftwagens mit hybriden Antriebsstrang. Technische Universität München. Bachelorarbeit (2011)
- [Tah13]: TAHERI-POUR, Mohammed-Ali: Modellierung von Nebenaggregaten im Hybrid-Lastkraftwagen. Technische Universität München. Semesterarbeit (2013)
- [Win11]: WINKLER, Thomas: Energiemanagement in hybriden Kraftfahrzeugen. Technische Universität München. Semesterarbeit (2011)

Verzeichnis eigener Veröffentlichungen

- [Bui13]: BUITKAMP, C. ; SPIEGELBERG, G. ; LIENKAMP, M.: Reducing Costs during Development and Operation of Hybrid Commercial Vehicles through a Market-based Electrical Energy Management. In: HOFF, Carsten; SIRCH, Ottmar (Hrsg.): Elektrik, Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement IV : Mit 57 Tabellen. Renningen : expert-Verl, 2013 (Fachbuch / Haus der Technik, 130), S. 347–362
- [Mei14]: MEIS, Claudia ; LEHMANN, Michael ; LIENKAMP, Marcus ; SPIEGELBERG, Gernot: Development, Parameterization and Verification of a Series Hybrid Vehicle Model to investigate Energy Management Strategies. In: Conference on Future Automotive Technology 2014, 2014
- [Mei15]: MEIS, C. ; MÜLLER, S. ; ROHR, S. ; KERLER, M. ; LIENKAMP, M.: Guide for the Focused Utilization of Aging Models for Lithium-Ion Batteries – an Automotive Perspective. In: SAE World Congress 2015, 2015
- [Mer12]: MERCEP, L. ; BUITKAMP, C. ; STÄHLE, H. ; SPIEGELBERG, G. ; KNOLL, A. ; LIENKAMP, M.: The Innotruck Case Study on a Holistic Approach to Electric Mobility. In: SUBIC, Aleksandar; WELLNITZ, Jörg; LEARY, Martin; KOOPMANS, Lucien Clemens (Hrsg.): Sustainable automotive technologies 2012 : Proceedings of the 4th international conference. Berlin, Heidelberg : Springer, 2012 (Lectures notes in mobility), S. 277–287

Anhang

Anhang A: Übersicht Elektrifizierte Nutzfahrzeuge.....	cxxxvi
Anhang B: Referenz- und Messfahrt Berlin	cxxxviii
Anhang C: Vergleich der Leistungsverteilung beim flexiblen und regelbasierten Energiemanagement.....	cxxxix
Anhang D: Vergleich der Leistungsverteilung und der Betriebskosten mit dem flexiblen Energiemanagement beim ENUBA Lkw und Innotruck.....	cxlii
Anhang E: Vergleich der Leistungsflüsse beim flexiblen Energiemanagement beim ENUBA Lkw mit und ohne Oberleitung.....	cxlv
Anhang F: Vergleich der Leistungsflüsse beim flexiblen Energiemanagement beim Innotruck mit und ohne Oberleitung.....	cxlviii

Anhang A: Übersicht Elektrifizierte Nutzfahrzeuge

Hersteller	Modell	Energie Quelle	Literaturangabe
Alexander Dennis	Enviro 350H	Dieselmotor, Batterie	[Ale11]
AMZ	City Smile CS 10E	Batterie	[Omn12, S. 11]
BredaMenarinibus	E-Vivacity	Batterie	[Bre12]
BredaMenarinibus	Zeus	Batterie	[Nau15, S. 41]
BYD	eBus-12	Batterie	[Ste12, S. 188]
ContraC Cobus	2500e	Batterie	[Nau15, S. 49]
DAF	LF Hybrid	Dieselmotor, Batterie	[DAF10]
Daimler Buses North America	Orion VII	Dieselmotor, Batterie	[Ste12, S. 178]
DesignLine	EcoSaver IV	Batterie, Dieselmotor (Optional)	[U.S10, S. 23]
DesignLine	EcoSmart	Batterie	***
Ebus	22FC	Brennstoffzellen, Batterie	[Nau15, S. 47]
Ebus	22HB	Dieselmotor, Batterie	[Nat04]
Ebusco	YTP-I	Batterie	[Gal14, S. 12]
El Dorado National & BAE	American Fuel Cell Bus	Brennstoffzellen, Batterie	[Lin11, S. 2]
GAZ Group	Liaz 6274	Batterie	[Bus12, S. 5]
Hess AG	Lighttram	Dieselmotor, Ultracap	[Hof10, S. 354]
Hyundai	FC Bus 1st Gen	Brennstoffzellen, Ultracap	[Jur12, S. 8]
Hyundai	FC Bus 2st Gen	Brennstoffzellen, Ultracap	[Jur12, S. 8]
Hyundai	Blue City	Batterie	[Hyu11]
Irisbus (iveco)	Citelis	Dieselmotor, Batterie	[Omn11, S. 5]
MAN	Lions-City Hybrid	Dieselmotor, Ultracap	[Ste12, S. 178]
MAN	Metropolis, TGS 6x2-4	Dieselmotor, Batterie	[Das12]
MAN	TGL 12.220 Hybrid	Dieselmotor, Batterie	[Hof10, S. 368]
Mercedes	Citaro-G Blue-Tec Hybrid	Dieselmotor, Batterie	[Ste12, S. 178]
Mercedes	Citaro FuelCell Hybrid	Brennstoffzellen, Batterie	[Ste12, S. 194]
Mercedes-Benz	Atego Blue-Tec Hybrid 1222L	Dieselmotor, Batterie	[Hof10, S. 373]
Mitsubishi Fuso	Fuso Canter Eco Hybrid	Dieselmotor, Batterie	[Hof10, S. 369]
NefaZ	52992	Batterie	[Lio15]
New Flyer	H40 LFR	Brennstoffzelle, Batterie	[Ste12, S. 194]
Nissan	Atlas 20	Dieselmotor, Batterie	[Nis06]
NovaBus (Volvo)	Nova LFS 40'	Dieselmotor, Batterie	[Eic12, S. 79]
NovaBus (Volvo)	Nova LFS 62'	Dieselmotor, Batterie	[Nov11, S. 2]

Anhang

Optare	Versa V1040-EV (hybrid)	Dieselmotor, Ultracap	[Opt15, S. 10]
Optare	Versa V1040-EV (electric)	Batterie	[Ste12, S. 190]
Optare	Solo M925SR-EV	Batterie	[Ste12, S. 191]
Proterra	EcoRide BE35	Batterie	[Ste12, S. 187]
PVI	Oreos 2x	Batterie	[Pow11, S. 6]
PVI	Oreos 4x	Batterie	[Pow11, S. 6]
Scania	Hybrid 0906	Dieselmotor, Ultracap	[Ste12, S. 193]
Siemens Actros	Enuba	Dieselmotor, Ultracaps, Oberleitung,	[Sie11, S. 36]
Sinuatec	Ultracap Bus	Batterie, Ultracap	[Gal14, S. 16]
SMG	Battery electric bus	Batterie	[Ste12, S. 189]
Solaris	Trollino 18	Dieselmotor, Oberleitung	[Gör12, S. 10]
Solaris	Urbino 18 Hybrid	Dieselmotor, Ultracap (optional), Batterie,	[Ste12, S. 179]
Solaris	Urbino 18 electric	Batterie,	***
Solaris	Urbino 12 electric	Batterie	[Omn12, S. 12]
Solaris	Urbino 8.9 LE electric	Batterie	[Ste12, S. 191]
SOR	EBN 10.5	Batterie	[Gör12, S. 15]
Tata	Starbus	Batterie	[Tat13, S. 6]
Tindo	Solar-electric bus	Batterie	[Ste12, S. 191]
Tolza	52501	Batterie, Ultracap	[Bus12, S. 5]
Van Hool	A330 Fuel Cell	Brennstoffzellen, Batterie	[Ste12, S. 184]
Van Hool	AG 300T	Dieselmotor, Brennstoffzellen, Batterie, Oberleitung, Ultracaps	[Gör12, S. 10]
Volvo	7700-Hybrid 2013	Dieselmotor, Batterie	[Ste12, S. 179]
Volvo	7900-Hybrid 2012	Dieselmotor, Batterie	[Gal14, S. 18]
Volvo	FE Hybrid	Dieselmotor, Batterie	[Hof10, S. 375]

Anhang B: Referenz- und Messfahrt Berlin

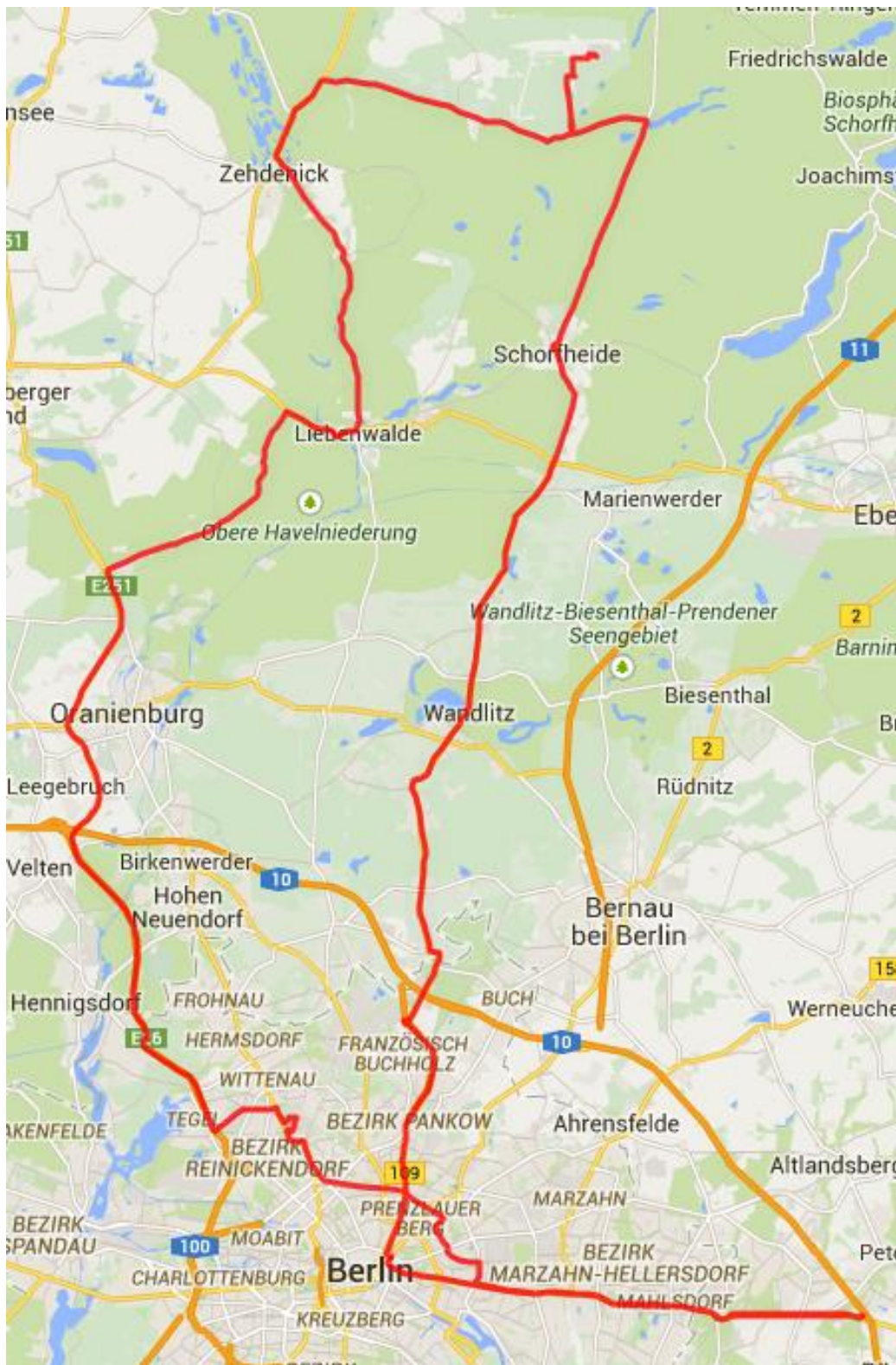


Abbildung B-1: Messfahrt in und um Berlin

Anhang C: Vergleich der Leistungsverteilung beim flexiblen und regelbasierten Energiemanagement

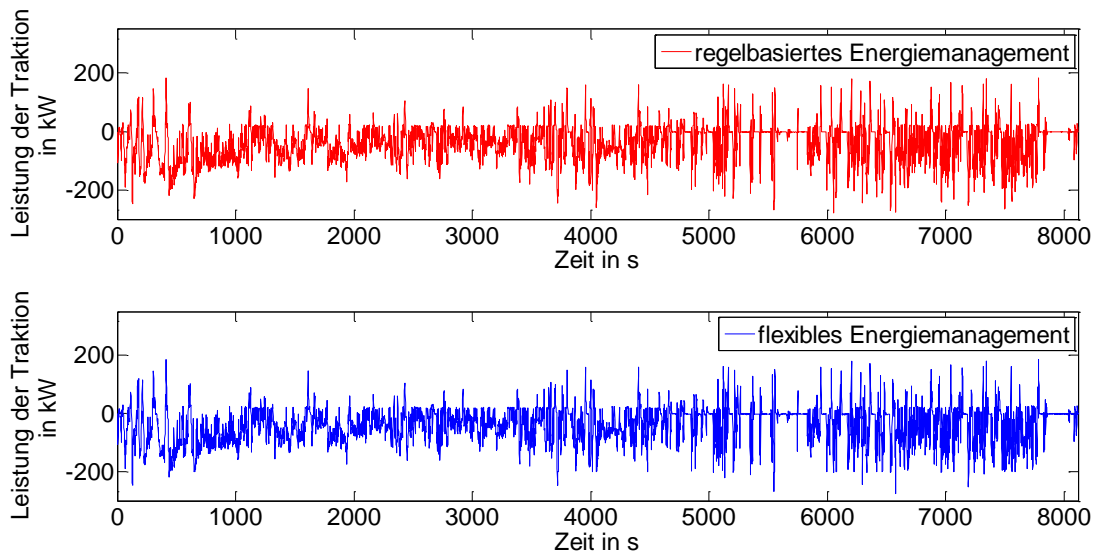


Abbildung C-1: Leistungsverlauf der Traktion beim regelbasierten Energiemanagement im Realfahrzeug und beim flexiblen Energiemanagement in der Simulation

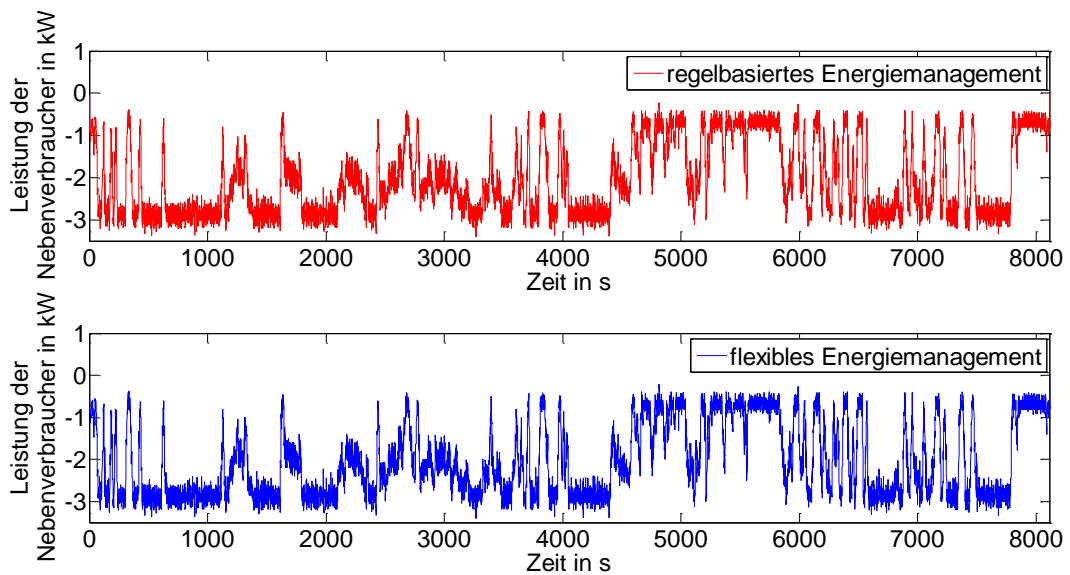


Abbildung C-2: Leistungsverlauf der Nebenverbraucher beim regelbasierten Energiemanagement im Realfahrzeug und beim flexiblen Energiemanagement in der Simulation

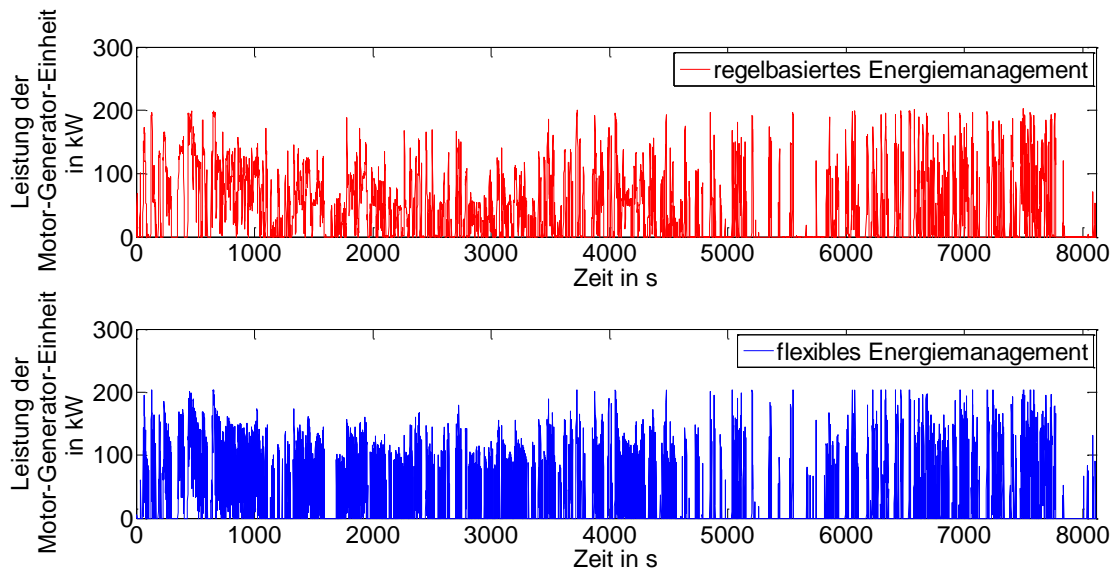


Abbildung C-3: Leistungsverlauf der Motor-Generator-Einheit beim regelbasierten Energiemanagement im Realfahrzeug und beim flexiblen Energiemanagement in der Simulation

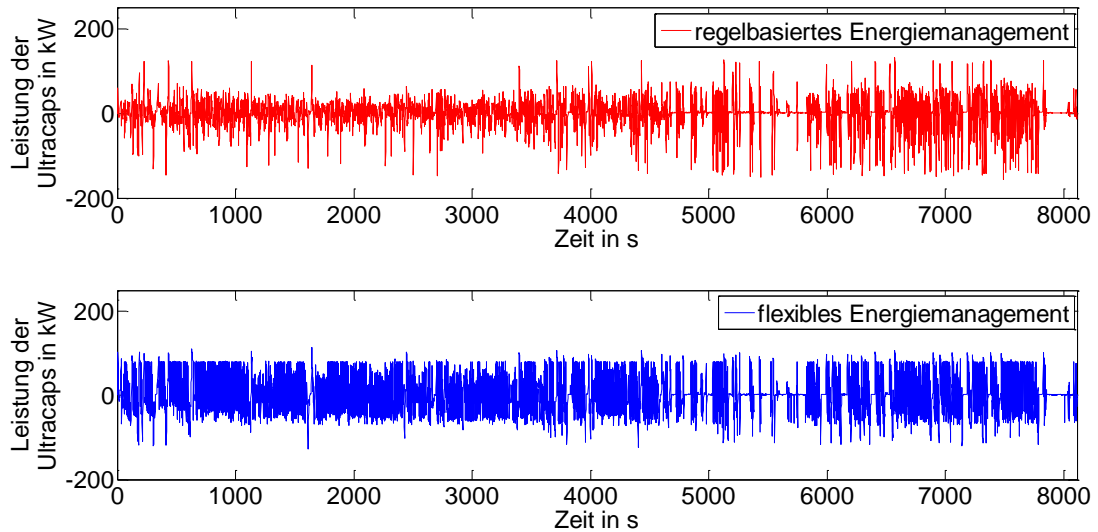


Abbildung C-4: Leistungsverlauf der Ultracaps beim regelbasierten Energiemanagement im Realfahrzeug und beim flexiblen Energiemanagement in der Simulation

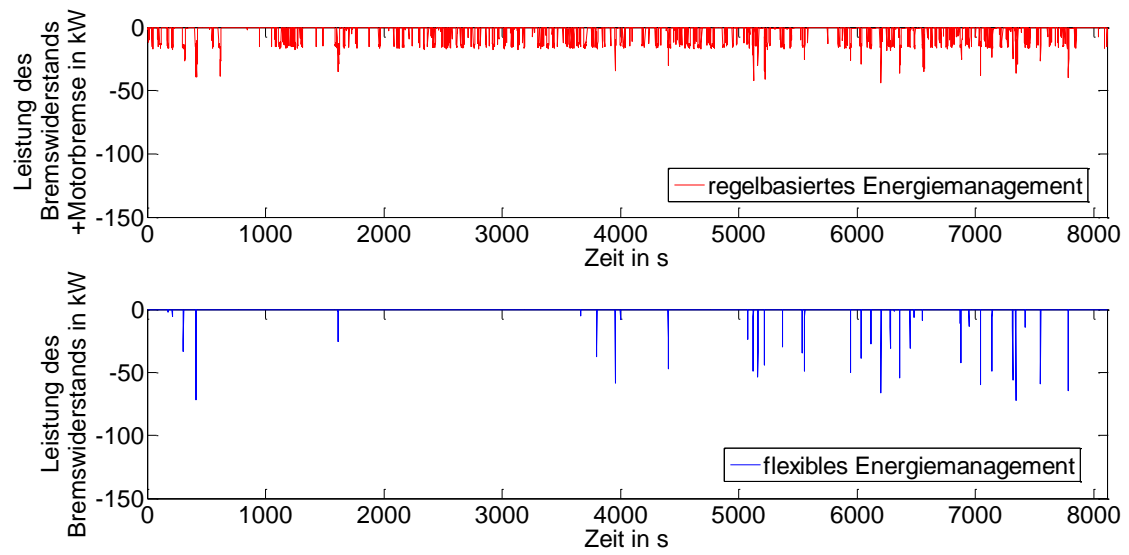


Abbildung C-5: Leistungsverlauf des Bremswiderstands und der Motorbremse beim regelbasierten Energiemanagement im Realfahrzeug und des Bremswiderstands beim flexiblen Energiemanagement in der Simulation

Anhang D: Vergleich der Leistungsverteilung und der Betriebskosten mit dem flexiblen Energiemanagement beim ENUBA Lkw und Innotruck

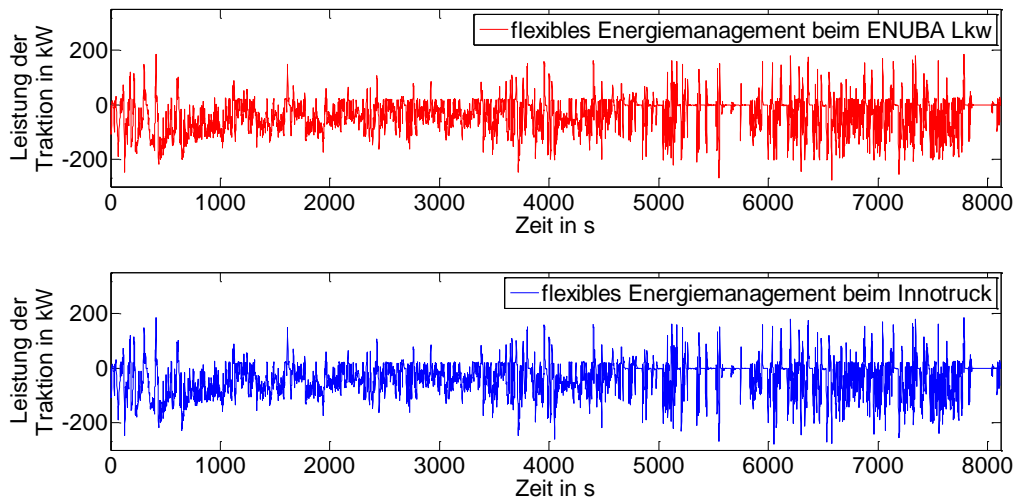


Abbildung D-1: Leistungsverlauf der Traktion beim flexiblen Energiemanagement mit einer Antriebsstrangvariante mit Batterie (Innotruck) und mit Ultracaps (ENUBA Lkw)

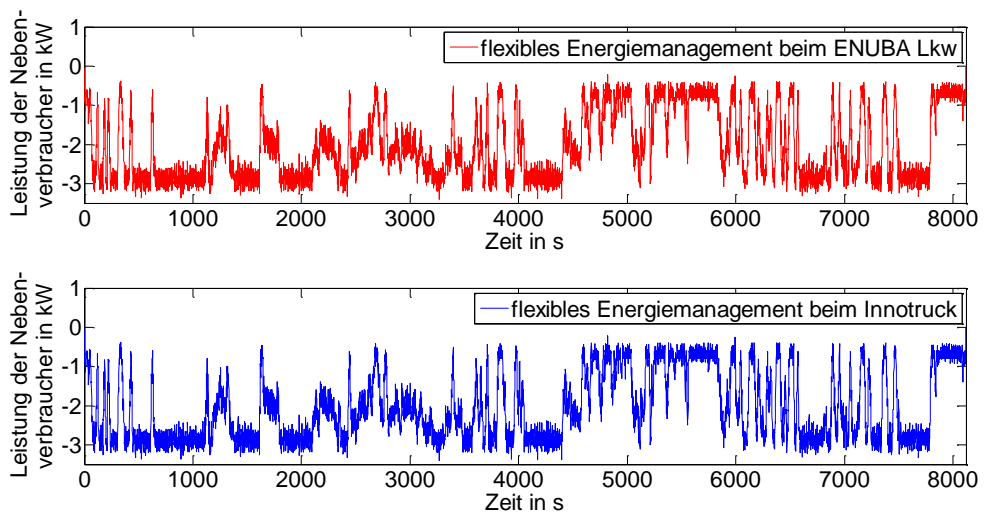


Abbildung D-2: Leistungsverlauf der Nebenverbraucher beim flexiblen Energiemanagement mit einer Antriebsstrangvariante mit Batterie (Innotruck) und mit Ultracaps (ENUBA Lkw)

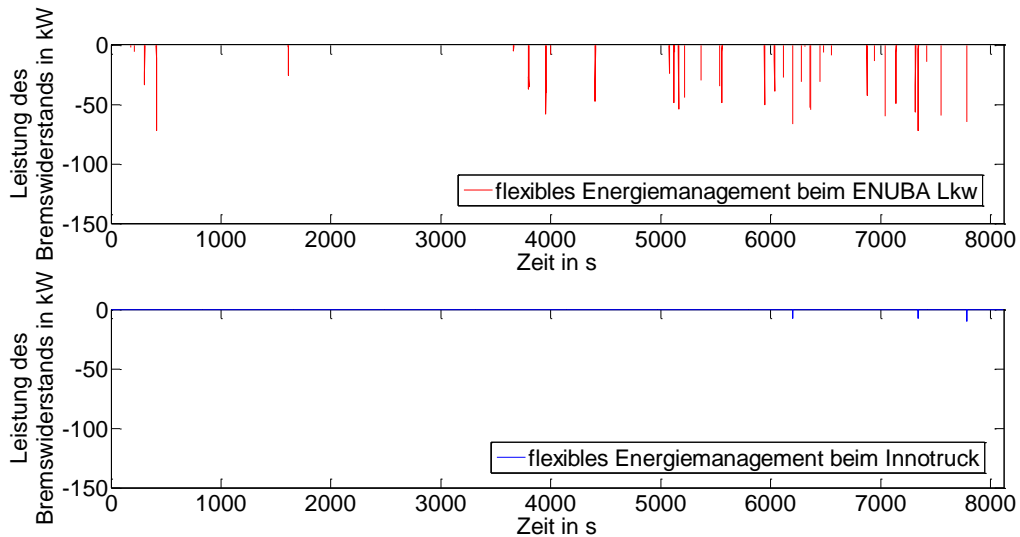


Abbildung D-3: Leistungsverlauf des Bremswiderstands beim flexiblen Energiemanagement mit einer Antriebsstrangvariante mit Batterie (Innotruck) und mit Ultracaps (ENUBA Lkw)

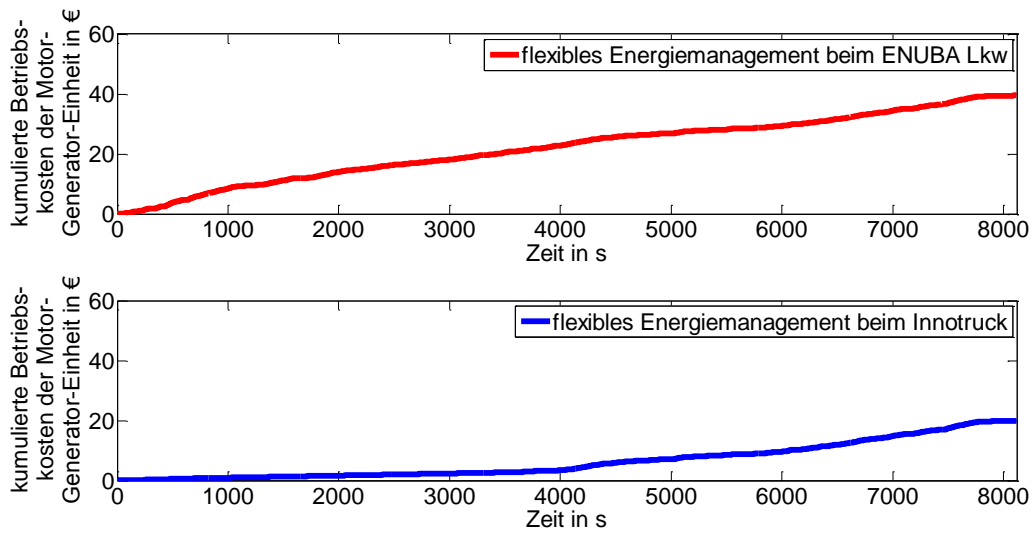


Abbildung D-4: Betriebskosten der Motor-Generator-Einheit mit dem flexiblen Energiemanagement beim ENUBA Lkw und Innotruck

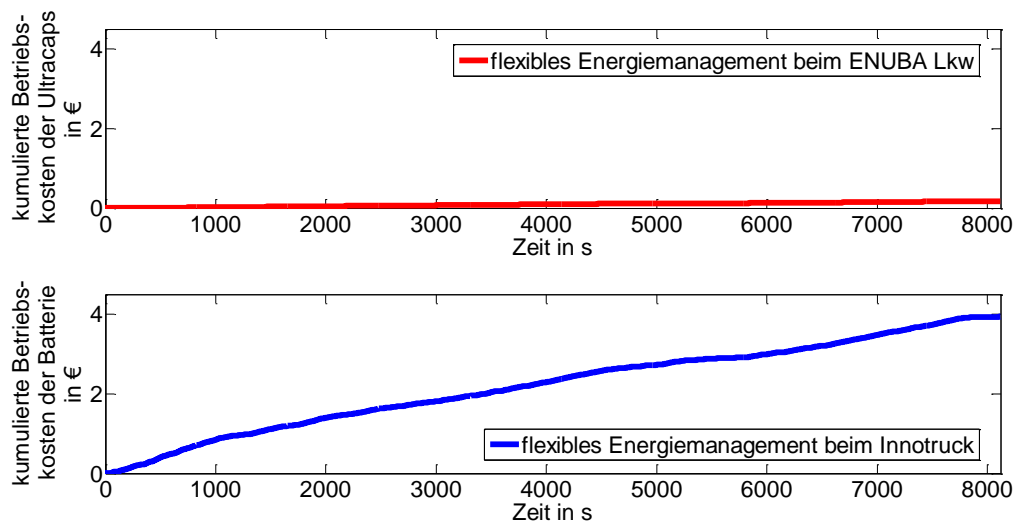


Abbildung D-5: Betriebskosten des elektrischen Speichers mit dem flexiblen Energiemanagement beim ENUBA Lkw und Innotruck

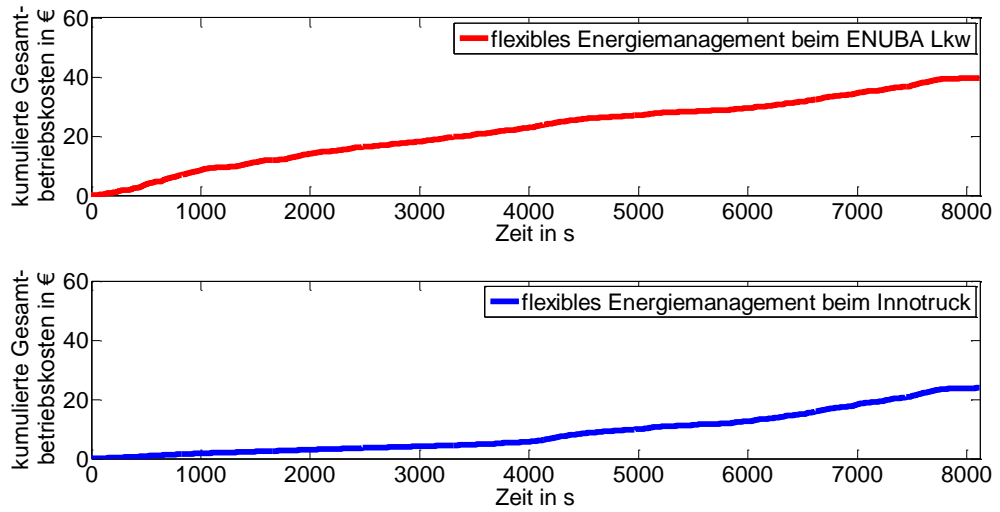


Abbildung D-6: Gesamtbetriebskosten mit dem flexiblen Energiemanagement beim ENUBA Lkw und Innotruck

Anhang E: Vergleich der Leistungsflüsse beim flexiblen Energiemanagement beim ENUBA Lkw mit und ohne Oberleitung

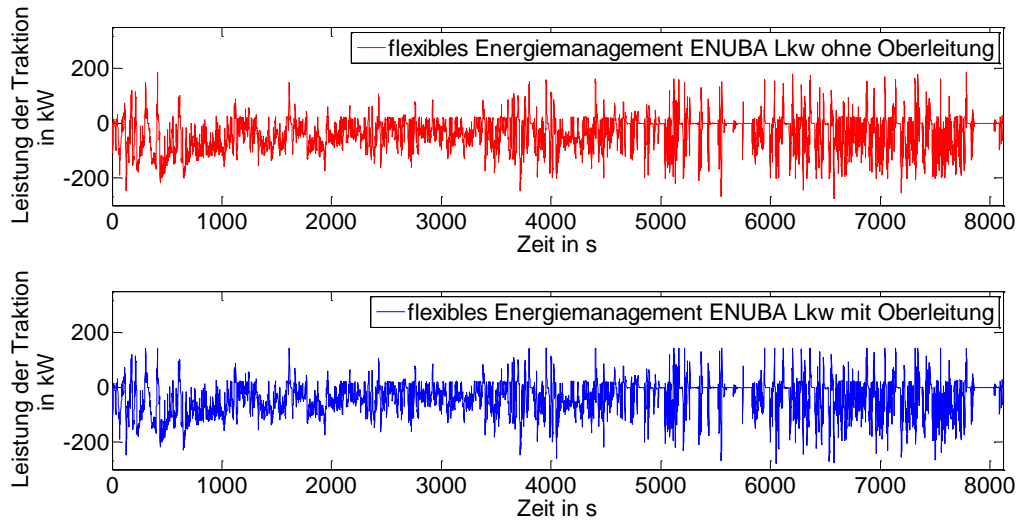


Abbildung E-1: Leistungsverlauf der Traktion beim flexiblen Energiemanagement für den ENUBA Lkw mit und ohne Oberleitung

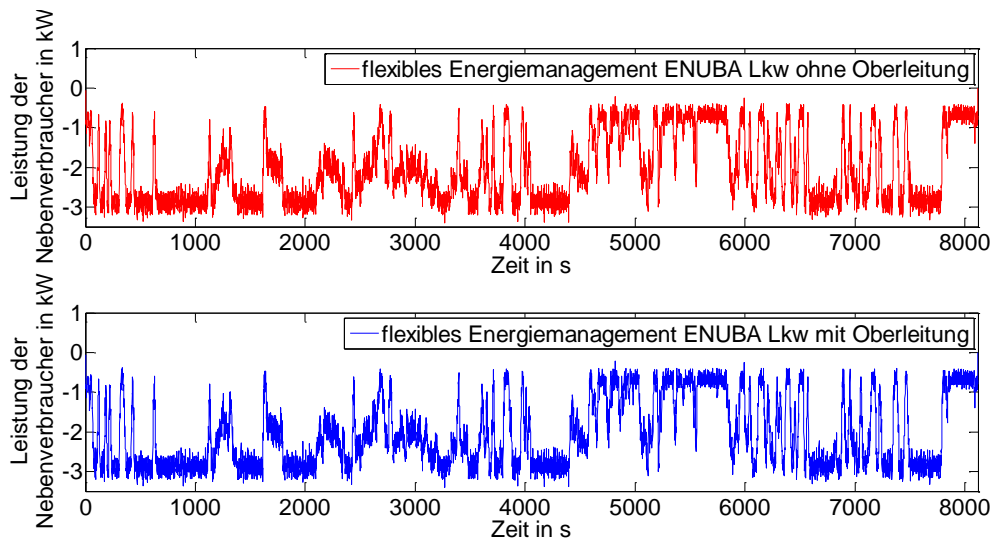


Abbildung E-2: Leistungsverlauf der Nebenverbraucher beim flexiblen Energiemanagement für den ENUBA Lkw mit und ohne Oberleitung

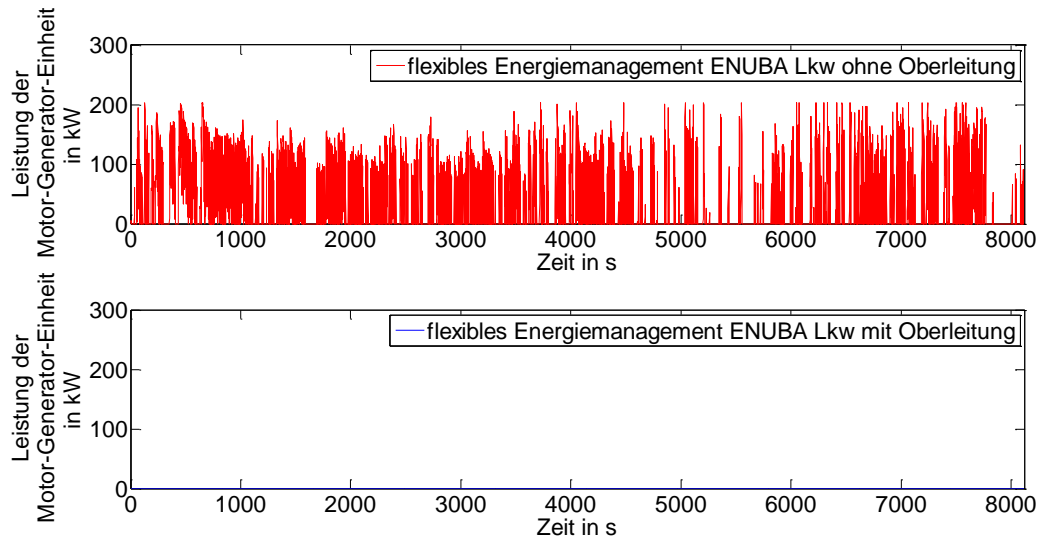


Abbildung E-3: Leistungsverlauf der Motor-Generator-Einheit beim flexiblen Energiemanagement für den ENUBA Lkw mit und ohne Oberleitung

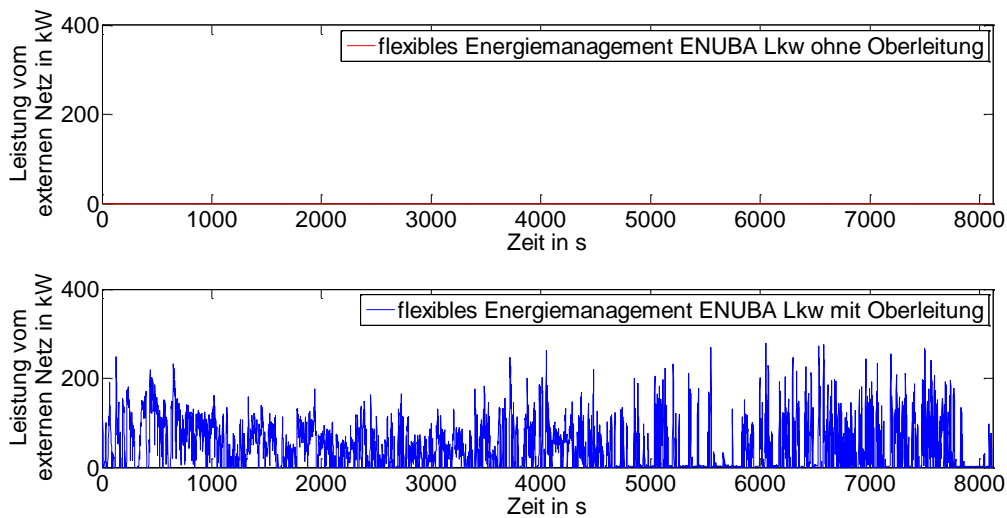


Abbildung E-4: Leistungsverlauf der Oberleitung beim flexiblen Energiemanagement für den ENUBA Lkw mit und ohne Oberleitung

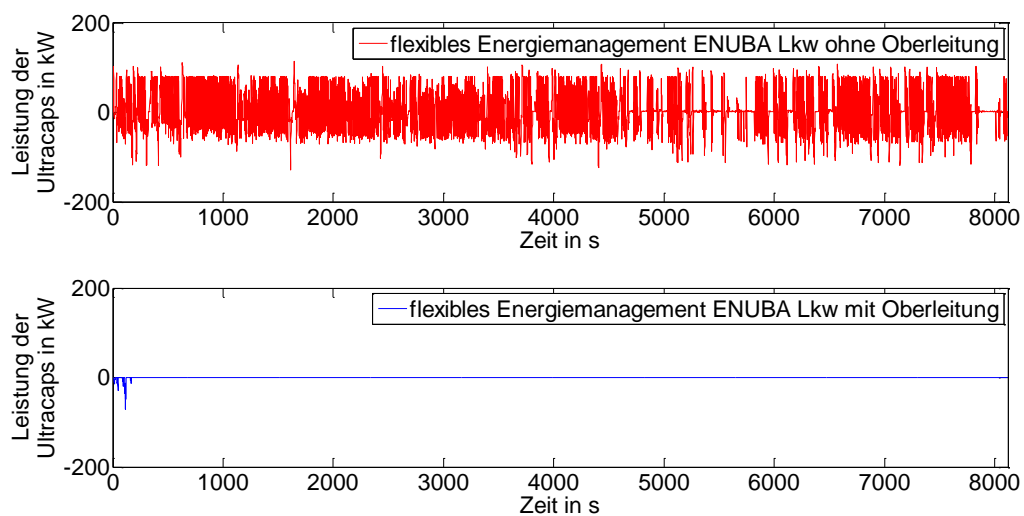


Abbildung E-5: Leistungsverlauf der Ultracaps beim flexiblen Energiemanagement für den ENUBA Lkw mit und ohne Oberleitung

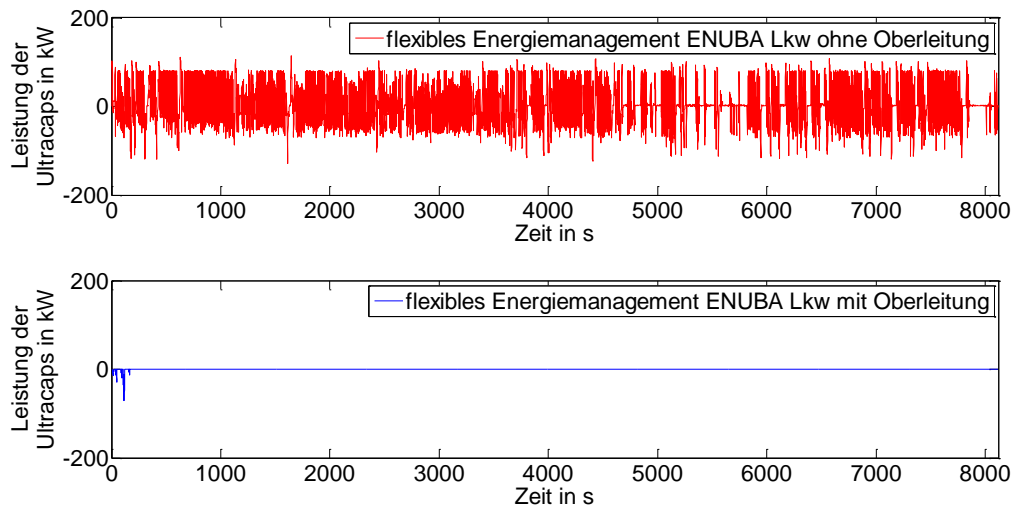


Abbildung E-6: Ladezustandsverlauf der Ultracaps beim flexiblen Energiemanagement für den ENUBA Lkw mit und ohne Oberleitung

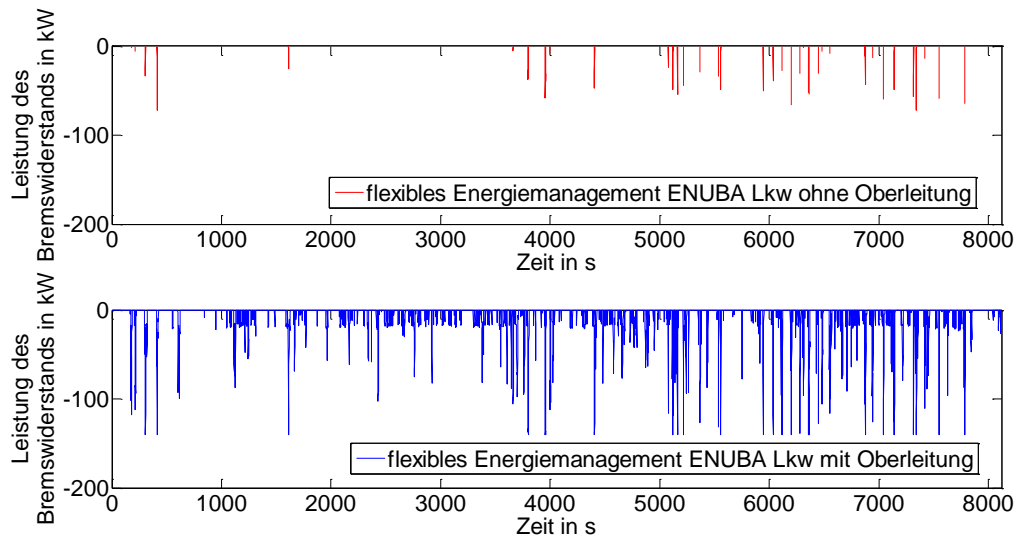


Abbildung E-7: Leistungsverlauf des Bremswiderstands beim flexiblen Energiemanagement für den ENUBA Lkw mit und ohne Oberleitung

Anhang F: Vergleich der Leistungsflüsse beim flexiblen Energiemanagement beim Innotruck mit und ohne Oberleitung

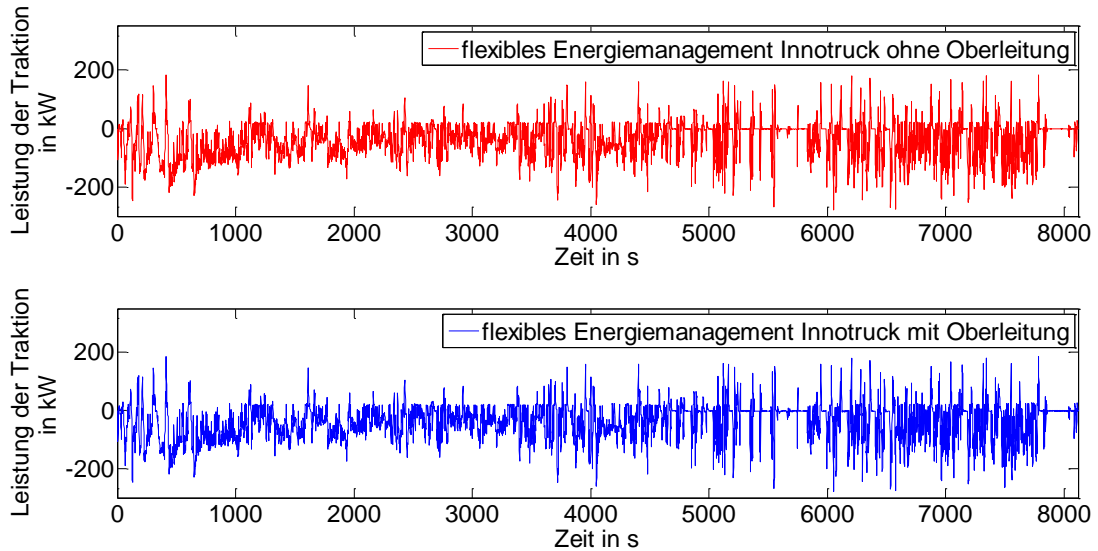


Abbildung F-1: Leistungsverlauf der Traktion beim flexiblen Energiemanagement für den Innotruck mit und ohne Oberleitung

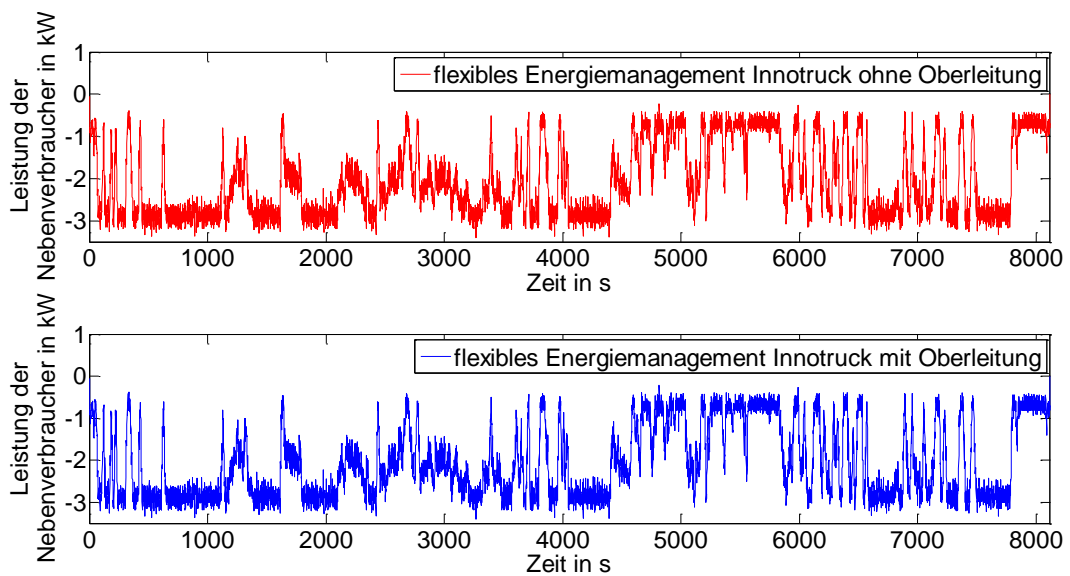


Abbildung F-2: Leistungsverlauf der Nebenverbraucher beim flexiblen Energiemanagement für den Innotruck mit und ohne Oberleitung

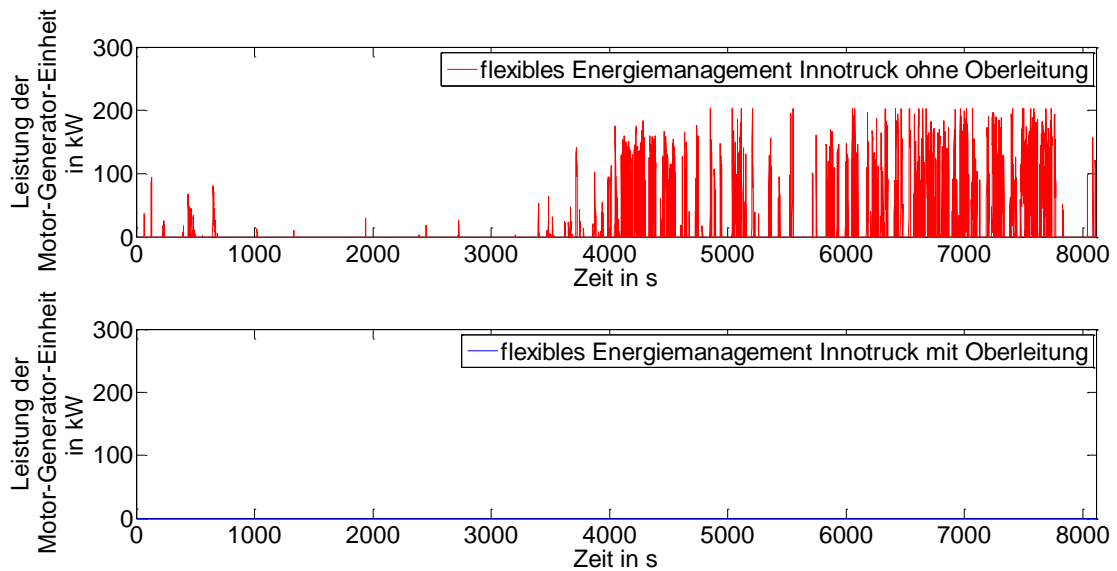


Abbildung F-3: Leistungsverlauf der Motor-Generator-Einheit beim flexiblen Energiemanagement für den Innotruck mit und ohne Oberleitung

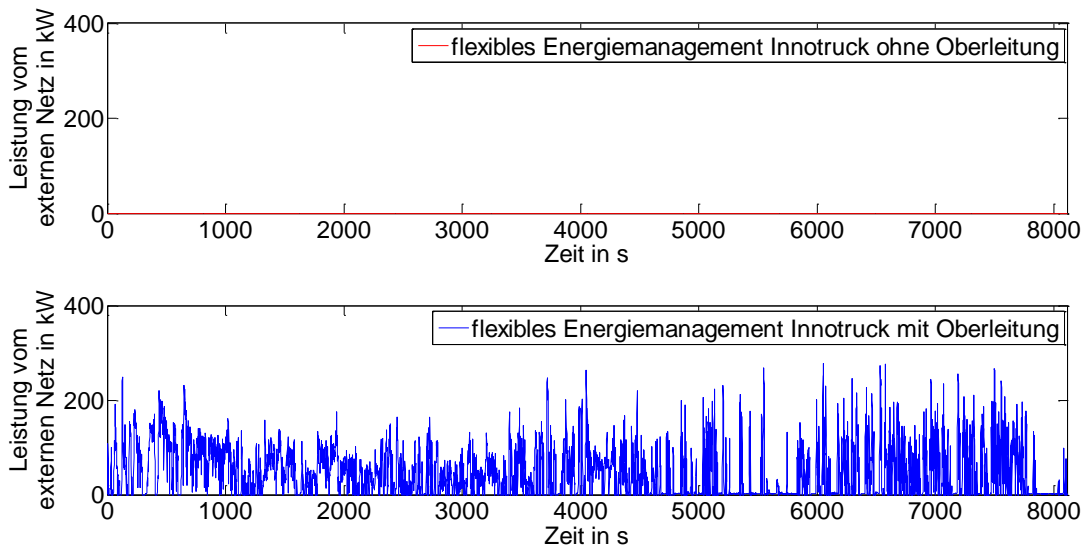


Abbildung F-4: Leistungsverlauf der Oberleitung beim flexiblen Energiemanagement für den Innotruck mit und ohne Oberleitung

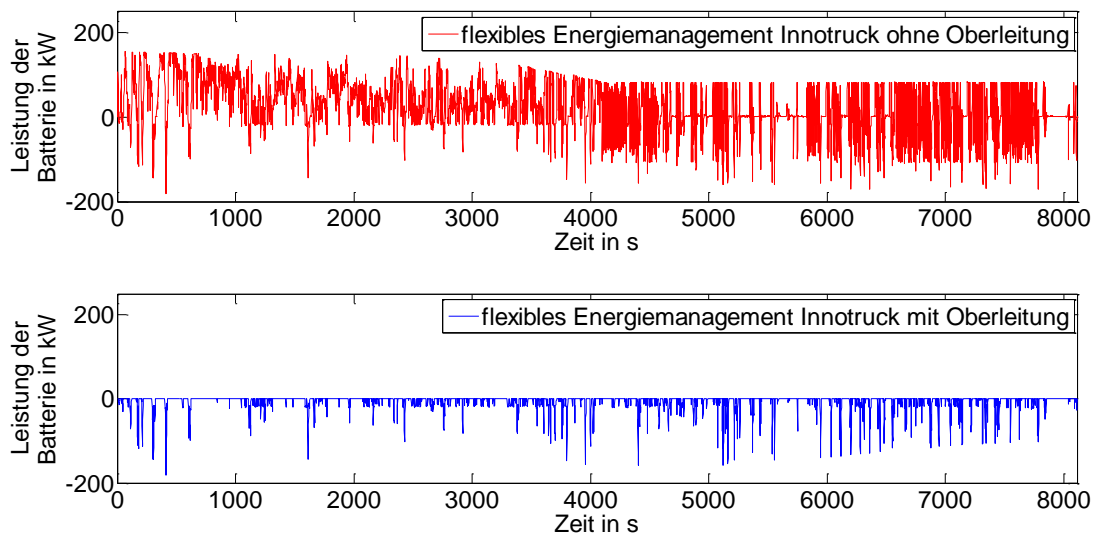


Abbildung F-5: Leistungsverlauf der Batterie beim flexiblen Energiemanagement für den Innotruck mit und ohne Oberleitung

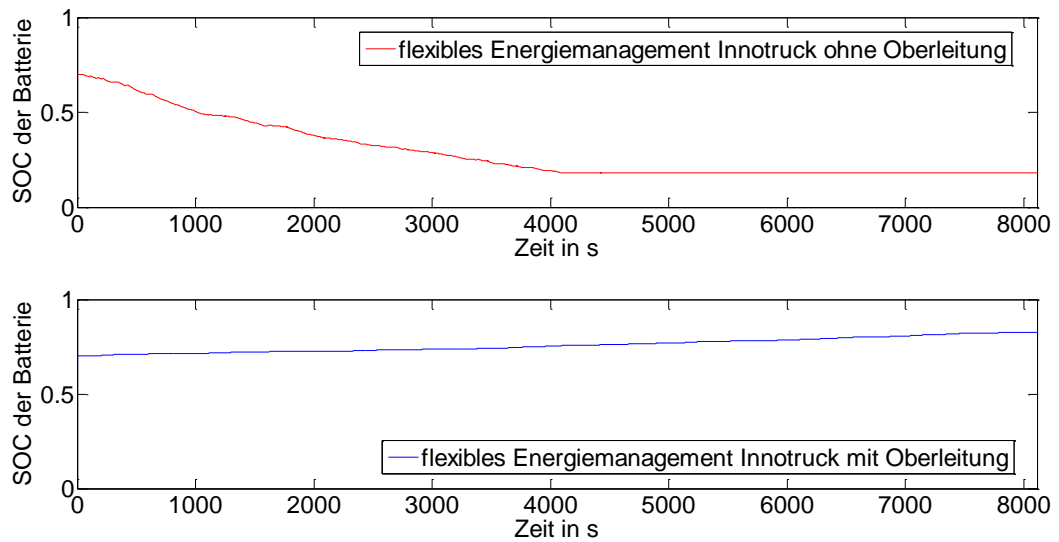


Abbildung F-6: Ladezustandsverlauf der Batterie beim flexiblen Energiemanagement für den Innotruck mit und ohne Oberleitung

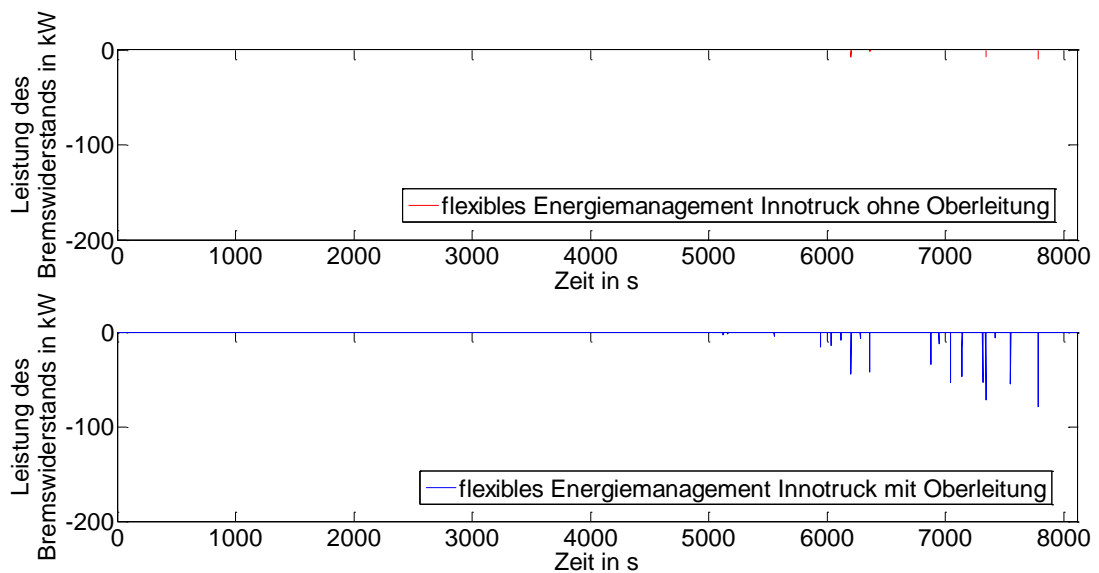


Abbildung F-7: Leistungsverlauf des Bremswiderstands beim flexiblen Energiemanagement für den Innotruck mit und ohne Oberleitung