

Dipl. Ing. Gerfried Hans Cebrat

TELEMATIK-BASIERTES ENERGIEMANAGEMENT FÜR HYBRID-ELEKTRISCHE NUTZFAHRZEUGE IM STADTVERKEHR

Dissertation

vorgelegt an der

Technischen Universität Graz

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Technischen Wissenschaften (Dr. techn.)

Begutachtet vom Institut für Thermodynamik und Verbrennungskraftmaschinen, Technische
Universität Graz

Vorstand: O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Eichlseder

Graz, im Dezember 2014

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 14.12.2014

(Unterschrift)

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quotes either literally or by content from the used sources.

Date 2012/12/14

(signature)

1 ABSTRACTS

1.1 ABSTRACT ENGLISH

Immission problems, namely air pollution and noise, are ubiquitous in cities. They are caused partly by heavy vehicle traffic, comprising buses. New hybrid propulsion solutions, employing serial hybrid power trains, help reducing emission problems and reducing fuel consumption. Hybrid-electric power trains are widely used in Northern America for city buses, thanks to financial incentives. In Europe, they were subject to trials for many years and are now available on the market, beginning to penetrate them. The following thesis defines and investigates a new approach for a tactical control (e.g. energy management) of the operation of the fuel converter set of a serial hybrid power train, consisting of an internal combustion engine and a generator. The tactic control is processing actual parameters of the power train and/or position data stemming from telematics applications in a heuristic algorithm. In the simplest case, data from telematics provides location based info, specifying the travel distance of a vehicle related to the upcoming events, namely prognosed halts.

In its first part, the thesis describes relevant developments of hybrid electric technology, especially for heavy-duty transport, resp. buses. The main components of the modelled power train architecture are enumerated, followed by an explanation of the selection of the components for propulsion, fuel converter, and energy storage. In the following, the fundamentals of the tactical energy management system are described, specifying the control options for the motor-generator-set (genset). An analysis of the suitability of advanced telematics systems follows, refining data accuracy of pending forced stops. Intense endeavour was exerted optimizing and validating algorithms for the tactical energy management e.g. operation of the genset. The backward-looking simulation model¹ (1), build from scratch using *Mathcad*, and in most cases using measured efficiency and emission data stored in matrices depending on load and RPM of the machines, is explained. In the simulation of measured trips, the hysteresis control of the genset could be modulated using empiric control algorithms. For the search for the optimum, a *Monte-Carlo* variation of the weights for the parameters, influencing the set point of the hysteresis control was chosen. This allowed varying more than two dozen parameters influencing hysteresis control of the genset. They were stemming either from telematics or from internal genset data automatically, also including tactical decisions about the influence of the distance or its inverse to the next predicted halt. The tactical energy management was tested using different measured and combined measured trip data and assessed via different statistical elaborations, analysing the optimal combinations for the influence factors on the genset control, featuring the on-off operation scheme. An additional dimension of the problem was addressed when varying the capacity of the energy storage and the ancillary energy demand. Finally, the variants of the tactical energy management were tested, transferring parameters resulting from optimisation using a subset of measured trip segments to the complete set of measured trips. An analysis of the feasibility of telematics architecture for the data supply and an economic analysis of the implementation amends the thesis.

¹ i. e. inverse modelling, starting with the given driving curve.

1.2 KURZFASSUNG DEUTSCH

Immissionsprobleme, die Luftqualität und Lärm umfassen, sind in Städten überall anzufinden und werden u. a. durch den Schwerverkehr verursacht, welcher auch Busse mit einschließt. Neue Antriebslösungen, die seriell-hybride Konzepte nutzen, können helfen die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch zu verringern. Hybrid-elektrische Antriebe bei Linienbussen sind in Nordamerika aufgrund von finanziellen Anreizen bereits weiter verbreitet und beginnen nach einigen Jahren im Versuchseinsatz nun auch in Europa die Märkte zu durchdringen. Die folgende wissenschaftliche Arbeit definiert und untersucht einen neuen Ansatz für eine taktische Regelung (Energiemanagement) des Betriebs des Stromerzeugers, bestehend aus Verbrennungskraftmaschine und Generator. Dabei werden in der Regelung Zustandsinformationen des hybrid-elektrischen Antriebssystems und/oder Positionsinformationen des Fahrzeuges zur Erfassung der Fahrstrecke zu möglichen kommenden Zwangshalten in heuristischen Algorithmen genutzt.

Die Arbeit beschreibt die relevanten Entwicklungen der Hybrid-Antriebstechnologie, speziell im Bereich Schwerverkehr/Busse, und die wesentlichen Komponenten, bevor der Simulationsansatz erläutert und die Grundlagen der Systemarchitektur des Antriebsstranges und der Regelungstaktiken beschrieben werden. Danach werden fortschrittliche Telematiksysteme für die Verbesserung der Genauigkeit der Datenbasis für die potentiellen Zwangshalte analysiert. Der Hauptfokus der Arbeit liegt auf der Optimierung und Untersuchung von heuristischen Algorithmen für das taktische Energiemanagement, d. h. der Regelung des Betriebs des Motor-Generator-Satzes. Das Simulationsmodell wurde von Grund auf eigenständig als quasistatische rückwärts blickende (*backward-looking*) Simulation² (1) in *Mathcad* implementiert. Es nutzt überwiegend Effizienz- und Emissionsdaten, die in Matrizen in Abhängigkeit von Last und Drehzahl abgelegt wurden. Zur Optimierung wurde eine *Monte-Carlo* Variation der Simulationsparameter gewählt, was erlaubte, automatisch mehr als zwei Dutzend Parameter zu variieren, die die Hystereseregulierung beeinflussen. Diese stammen entweder aus Telematikanwendungen oder aus Zustandsdaten des Motor-Generator-Satzes und enthalten unter anderem auch taktische Entscheidungen, wie die Wahl des Vorzeichens des Einflusses des Abstandes zum nächsten Halt. Die Methode des taktischen Energiemanagements wurde über verschiedene statistische Ausarbeitungen hinterfragt, um die optimalen Einflüsse auf die Regelung des On-Off Betriebs des Stromerzeugers zu bestimmen. Für die Untersuchungen wurden Fahrtentupel auf der Basis gemessener Fahrtsegmente und kombinierter gemessener Fahrtsegmente benutzt. Das Optimierungsproblem wurde durch die Variation des Inhaltes des Energiespeichers und der für Nebenaggregate erforderlichen Energie in seiner Dimension erweitert. Schlussendlich wurde die Übertragung der Parameter aus einer Optimierung für eine Teilmenge der für die Simulation benutzen Fahrten auf alle Fahrten vorgenommen um die Verfahren für das taktische Energiemanagement zu testen. Eine Untersuchung der Machbarkeit der Telematik-Alternativen für die Datenversorgung und eine ökonomische Analyse der Umsetzung komplettieren die Arbeit.

² i. e. eine inverse Modellierung beginnend mit den Auswirkungen, hier der Fahrkurve.

1.3 INHALTSVERZEICHNIS

1	Abstracts.....	3
1.1	Abstract English.....	3
1.2	Kurzfassung Deutsch.....	4
1.3	Inhaltsverzeichnis.....	5
2	Persönliches.....	9
2.1	Persönlicher Zugang.....	9
2.2	Dank.....	9
3	Varianten für einen Hybridantrieb in Bussen.....	10
3.1	Einleitung.....	10
3.2	Ansätze zu Verbesserung der Umweltfreundlichkeit.....	10
3.3	Stand der Technik des Hybridantriebes, speziell bei Bussen.....	11
3.3.1	Begriffsdefinition.....	11
3.3.2	Geschichte und Marktüberblick.....	11
3.3.3	Vergleich der Hybridkonzepte.....	14
3.3.4	Seriell-Hybride Antriebssysteme.....	14
3.3.5	Leistungsverzweigte Hybridantriebe.....	16
4	Fahrzeugmodellierung für die Simulation.....	19
4.1	Einleitung.....	19
4.2	Fahrzeugcharakteristik Längsdynamik.....	19
4.2.1	Luftwiderstand.....	19
4.2.2	Rollwiderstand.....	20
4.2.3	Massen.....	21
5	Systemkomponenten seriell-hybrider Antrieb.....	23
5.1	Einleitung.....	23
5.2	Systemübersicht simuliertes seriell-hybrides Antriebskonzept.....	23
5.3	Dimensionierung der Komponenten.....	24
5.3.1	Auslegung Nennleistung Motor-Generator-Satz (VKM).....	24
5.3.2	EDLC Dimensionierung.....	26
5.4	Sensibilitätsanalyse Antriebsleistung.....	28
5.5	Charakterisierung seriell-hybrider Antriebssysteme.....	29
5.5.1	Vorteile durch seriell-hybride Antriebssysteme.....	29
5.5.2	Grundsätzliche Dimensionierung des seriell-hybriden Antriebssystems.....	30
5.6	Speichersysteme für Hybridantriebe.....	33
5.6.1	Anforderungen an Energiespeicher.....	33
5.6.2	Technische Entwicklung der Speichersysteme.....	34
5.6.3	Eigenschaften der elektrischen Doppelschicht-Kondensatoren EDLC.....	35
5.6.4	Auswahl des Energiespeichers für die Anwendung.....	37
5.6.5	Vergleich von EDLC und von Lithium Polymer Sekundärzellen in der Anwendung	38
5.7	Auswahl von Stromerzeuger und Antriebsmotor Räder.....	40
5.7.1	Auswahl des Stromerzeugers.....	40
5.7.2	Auswahl des elektrischen Antriebsmotors.....	41
6	Energieverluste und Energiebilanz seriell-hybride Antriebssysteme.....	42
6.1	Einleitung.....	42
6.2	Mechanische Verluste.....	42
6.3	Elektrische Verluste.....	43

6.3.1	Effizienz Elektromaschinen.....	43
6.3.2	Spannungsanpassung über Hoch- Tiefsetz- Steller.....	47
6.3.3	Ohmsche Verluste Verbindungsleitungen.....	49
6.3.4	Verluste im Energiespeicher (EDLC).....	50
6.3.5	Verluste in der VKM	51
6.4	Energiebilanz seriell-hybrider Antrieb.....	55
6.4.1	Energieströme	55
6.4.2	Quantifizierung der Energieverluste.....	56
7	Entwicklung eines Optimierungsansatzes für seriell-hybride Antriebssysteme	58
7.1	Einleitung	58
7.2	Optimaler Betriebspunkt der Kombination VKM mit Generator	58
7.2.1	Aufgabenstellung.....	58
7.2.2	Überlagerung der Verbrauchs und Wirkungsgrad-Kurven	59
7.2.3	Berücksichtigung von Pönalen für Masse und Getriebeverluste.....	60
7.2.4	Suche des lastabhängigen Optimums.....	64
7.2.5	Berücksichtigung des Spannungseinflusses für eine Optimierung während des Betriebes.....	65
7.3	Simulationsumgebung für die Optimierung der Hystereseregulung des Motor-Generator-Satzes.....	68
7.3.1	Systemarchitektur der Simulation	68
7.3.2	Ablauf Simulation Fahrzeugantrieb.....	69
7.4	Optimale taktische Regelung bei seriell-hybriden Antrieben	71
7.4.1	Anforderungen taktische Optimierung	71
7.4.2	Ziele für die taktische Optimierung des Hybridantriebes	72
7.5	Wechselwirkungen bei der Dimensionierung des seriell-hybriden Antriebssystems..	74
7.5.1	Überblick Einflüsse	74
7.5.2	Einfluss Nennleistung Motor-Generator-Satz.....	75
7.5.3	Einfluss Speicherinhalt EDLC	76
8	Möglichkeiten der Datengewinnung für das taktische Energiemanagement.....	79
8.1	Einleitung	79
8.2	Ermittlung der Fahrkurven für die Simulation.....	79
8.3	Erkennung der Potentiellen Zwangshalte	82
8.4	Statische oder lernende Verfahren der Datengewinnung.....	83
8.5	Bewertung der Datengewinnungsverfahren	84
8.5.1	Datenqualität und Anforderungen	84
8.5.2	Systemarchitekturen Datengewinnung	85
8.5.3	Bewertung der Datengewinnungsverfahren	87
9	Modellierungsansatz des Telematik-gestützten taktischen Energiemanagements	89
9.1	Einleitung	89
9.2	Ansätze für eine Regelungstaktik seriell-hybrider Antriebe	89
9.2.1	Aufgabenstellung für die Optimierung von Hybridantrieben.....	89
9.2.2	Rechercheergebnis mögliche Optimierungsverfahren.....	89
9.2.3	Bekannter Stand der Technik taktische Regelungsansätze	91
9.3	Arbeitshypothese für das taktische Energiemanagement.....	92
9.3.1	Basis-Regelungsmodell zur Optimierung während der Fahrt.....	92
9.3.2	Modulation der Schaltgrenzen (SOC-Vorgaben)	95
9.4	Implementierung der Simulation des taktischen Energiemanagements	97
9.4.1	Datenmanagement Simulation	97

9.4.2	Simulationsverfahren	98
9.4.3	Implementierte Modulation der SOC-Grenzen.....	98
9.4.4	Ablauf der Optimierung mit Einsatz der Monte-Carlo Simulation.....	103
9.4.5	Eingrenzung des Zulässigen Lösungsraums bei der MC-Simulation	104
10	Einflussanalyse durch Variation einzelner Parameter bzw. von Parametergruppen	105
10.1	Einleitung	105
10.2	Sensibilitätsanalyse: Ergebnisse der Variation einzelner Zustandsgrößen zur Modulation der SOC-Schaltgrenzen	105
10.2.1	Einfluss der Laufzeit auf die SOC-Korrektur	106
10.2.2	Einfluss der Spannungsdifferenz auf die SOC-Korrektur	109
10.2.3	Einfluss der elektrischen Nettoleistung zum EDLC auf die SOC-Korrektur....	111
10.2.4	Einfluss SOC auf die SOC-Korrektur	114
10.3	Kombination der Einflüsse.....	116
10.3.1	Faktorisierung der Einflüsse auf alle SOC-Grenzen gemeinsam	116
10.3.2	Getrennte Betrachtung der Einflüsse auf die obere und untere SOC-Grenze	118
10.3.3	Exemplarische Variation von Faktoren für zwei Einflussgrößen	118
11	Analyse der Eignung der <i>Monte-Carlo</i> -Simulation für die Bestimmung des optimalen Modulationsschemas für die Schaltgrenzen	120
11.1	Vorgehensmodell bei Nutzung der MC-Variation.....	120
11.1.1	Einleitung	120
11.1.2	Vorgehensweise bei den Untersuchungen	120
11.1.3	Teststatistik.....	121
11.2	Verfahrensspezifische Untersuchungen.....	123
11.2.1	Einfluss der Zahl der Variationen.....	123
11.2.2	Einfluss der Modellierung des Betriebes (Verlauf der Nutzlast)	126
11.2.3	Nützlichkeit der Berücksichtigung des Abstandeinflusses.....	128
11.2.3.1	Validierung Ansatz 1: Vergleich von Lösungen mit und ohne Abstandseinfluss 128	
11.2.3.2	Validierung Ansatz 2: Übertragung der optimalen Lösung einer Teilmenge an Fahrten auf alle Fahrten.....	130
11.2.4	Vergleich mit einer alternativen Regelung des Motor-Generator-Satzes.....	130
11.3	Stabilität und Sensibilität	131
11.3.1	Stabilität des gefundenen optimalen Ansatzes	131
11.3.2	Sensibilität in Bezug auf die Datenqualität der Positionsdaten.....	134
11.3.3	Sensibilität in Bezug auf die erforderliche Energie für Nebenaggregate.....	137
11.4	Erforderliche Eingrenzungen des erwünschten Lösungsraums	138
12	Auswertung der MC-Simulationsergebnisse und Übertragung in die Praxis	140
12.1	Einleitung	140
12.2	Diskussion der Ergebnisse der gemeinsamen Variation aller Parameter.....	140
12.2.1	Erzielbare Kraftstoffeinsparungen	140
12.2.2	Beispielhaftes Ergebnis der MC-Simulation nur Zustandsfaktoren (ohne Abstandseinfluss) nahe dem Optimum für variable Busmasse	141
12.2.3	Beispielhaftes Ergebnis MC-Simulation mit Abstandseinfluss nahe dem Optimum für variable Busmasse	142
12.2.4	Beispielhaftes Ergebnis MC-Simulation mit Einfluss der Zustandsfaktoren und des Abstandes nahe dem Optimum für variable Busmasse	142
12.2.5	Korrelation der Ergebnisse mit den Einflussgrößen.....	143
12.2.6	Streuung der Einflussparameter für die besten Lösungen.....	145

12.3	Variation des Energieinhaltes des EDLC	147
12.3.1	Grundlagen.....	147
12.3.2	Umsetzung Erweiterte Monte Carlo Simulation.....	147
12.3.3	Ergebnisse erweiterte Monte Carlo Simulation	148
12.4	Auswirkung der Verbrauchsoptimierung auf die Emissionen.....	150
12.5	Übertragung der Ergebnisse in die Praxis.....	152
12.5.1	Vorgehensmodell für die Umsetzung in der Praxis	152
12.5.2	Systemarchitektur Datengewinnung und -verteilung für vom Abstand abhängige Verfahren.....	154
12.5.3	Verifizierung der Systemarchitektur	157
12.5.4	Kosten-Nutzen Betrachtung	159
13	Zusammenfassung.....	161
14	Verzeichnisse.....	165
14.1	Einflussfaktoren in der <i>Monte-Carlo</i> -Simulation	165
14.2	Abkürzungen.....	166
14.3	Literaturverzeichnis (nach ISO 690)	168
14.4	Abbildungen.....	183
14.5	Tabellen	187
14.6	Formeln.....	188
14.7	Eigene Veröffentlichungen zum Thema.....	189

2 PERSÖNLICHES

2.1 PERSÖNLICHER ZUGANG

Schon im Titel der Arbeit werden neben der Fahrzeugtechnik zwei in der Arbeit behandelte Fachgebiete erwähnt, Telematik und Elektrotechnik. Dies spiegelt die berufliche fächerübergreifende Beschäftigung mit den Themen Telematik im Öffentlichen Verkehr von 2000 bis 2006, sowie *Ecodriving* und Alternative Antriebssysteme, mit Fokussierung auf elektrische Antriebssysteme, von 2005 bis 2011 in der Forschungsgesellschaft Mobilität wieder. Im EU Projekt *su:gre sustainable green fleets* (gefördert im Programm *Intelligent Energy Europe*) wurden dabei eingehende eigene Recherchen zu den Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten **Alternativer Antriebssysteme** durchgeführt und es entstand daraus ein Entscheidungstool für Flottenbetreiber. Während in diesem Projekt die Nutzungscharakteristik der Fahrzeuge und Wissen zu den Antriebstechnologien erarbeitet wurde, stammen die Erfahrungen zur Telematik aus der Entwicklung und Abwicklung von Projekten im Bereich Intelligente Verkehrssysteme, kofinanziert durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft.

Inspiriert durch Literatur (2), Interesse an kybernetischen Systemen (3) und gestützt durch langjährige Erfahrungen mit Simulationen in *Mathcad*, lag der Fokus dieser Arbeit auf der makroskopischen Simulation und Optimierung des **Energiemanagements**. Die folgende Aussage von Gavin Schmidt, Klimatologe und Ersteller von Klimamodellen am *NASA Goddard Institute for Space Studies* zeigt dabei die Problematik, aber auch den möglichen Nutzen der Modellierung: "Models are always wrong – the question is whether they are helpful, skillful." (4). Die Modellierung wurde benutzt, um einen innovative Ansatz für die das taktische Energiemanagement zu optimieren, und mit Zuhilfenahme von Telematik das Potential Alternativer Antriebssysteme besser ausnutzen zu können. So soll der Energiebedarf im Öffentlichen Nahverkehr signifikant gesenkt werden, und ebenso die lokalen Emissionen.

Die Entwicklungen im Bereich Antriebsstrang von hybrid-elektrischen Fahrzeugen (HEF) gehen derzeit in verschiedene Richtungen. Die Varianten reichen von Start-Stopp-Automatik über milde Hybridvarianten, die nur geringe rein elektrische Reichweiten haben, hin bis zu so genannten *Plug-In* HEFs, die Energie aus dem stationären elektrischen Netz beziehen. Dabei sollte der Mehraufwand für stärkere Elektromotoren und Sekundärbatterien in ökonomischer und ökologischer Hinsicht untersucht werden, z. B. in einer Lebenszyklusanalyse (5). Eine Bewertung ist aber nur fair, wenn die verglichenen Antriebsarten die gleiche technologische Reife besitzen. Das vorgestellte Verfahren für ein taktisches Energiemanagement beim seriell-hybriden Antrieb soll helfen ein Anwendungsgebiet für den seriell-hybriden Antrieb weiter zu entwickeln und die ökologische Bilanz über eine intelligente Regelung zu verbessern, welche den Kraftstoffverbrauch im Betrieb (Tank zu Rad Aufwand) verringert.

2.2 DANK

An dieser Stelle muss den Betreuern aufrichtiger Dank für ihre Geduld ausgesprochen werden. Die Idee für die Arbeit und die Umsetzung entstand während der Abwicklung von Projekten 2006 mit einem Paper zum Thema (siehe 14.7). Wegen der Notwendigkeit immer neue Projekte einzureichen und dann auch abzuwickeln, war in den ersten Jahren wenig Zeit sich kontinuierlich mit einem einzelnen Thema zu beschäftigen. Es fand sich schlussendlich durch berufliche Veränderungen die Zeit das Simulationsprogramm zu verbessern und auf eine stabilere *Mathcad*-Version zu migrieren. Ohne aber die Hilfe besonders in Bezug auf die Berechnung der Verbrennungskraftmaschine wäre eine Vollendung in dieser Tiefe nicht möglich gewesen, herzlichen Dank für die das Projekt entwickelnden Gespräche und die Verbesserungs- und auch Kürzungsvorschläge.

3 VARIANTEN FÜR EINEN HYBRIDANTRIEB IN BUSSEN

3.1 EINLEITUNG

Das Potential zur Effizienzverbesserung durch Hybridisierung des Antriebsstranges, genauer gesagt durch die Elektrifizierung des Antriebsstranges, kann bei beinahe allen Fahrzeugen angewendet werden, die im städtischen oder innerbetrieblichen Einsatz mit einem hohen Anteil an transienten Vorgängen (vielen Halten und Anfahrvorgängen) benutzt werden. In diesem Kapitel werden, nach einem kurzen Abriss über die Alternativen zur Verbesserung der Umweltfreundlichkeit, die unterschiedlichen technischen Ansätze der Hybridantriebe für den **straßengebundenen Öffentlichen Linienverkehr** in Städten besprochen. Die existierenden mannigfaltigen Alternativen für hybride Antriebskonzepte, neuerdings auch für Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerung (*Range Extended Electric Vehicles* REEVs) erfordern eine Einschränkung auf ein Antriebkonzept, für das hier in weiterer Folge die taktische Regelung entwickelt und über eine Simulation validiert werden soll.

3.2 ANSÄTZE ZU VERBESSERUNG DER UMWELTFREUNDLICHKEIT

Zur Verbesserung der Umweltfreundlichkeit des Öffentlichen Verkehrs wurden in der Vergangenheit u.a. **automatisch geschaltete Getriebe** eingeführt, die komplexe vom Fahrzyklus abhängige Optimierungsstrategien anwenden, um den Kraftstoffbedarf zu verringern wie z. B. ein vom Fahrwiderstand abhängige Schaltsteuerung von *ZF* (6) oder ein von der Topografie abhängiges Schaltprogramm von *Voith* (7).

Auch wurden **alternative Treibstoffe** zur Anwendung gebracht, um die spezifischen Emissionen pro Kraftstoffbedarf zu verringern. Die längste, aber anscheinend nun endende Tradition hat dabei Flüssiggas bei den Wiener Linien; monovalent d. h. als ausschließlicher Kraftstoff ab 1976 (8). Erdgas hat als Kraftstoff in Europa besonders in Italien Verbreitung gefunden. Atmosphärisch arbeitende, niedrig verdichtende fremdgezündete Motore mit Erdgasbetrieb arbeiten jedoch, bedingt durch die Ansaugverluste im Teillastbereich, mit einer geringeren energetischen Effizienz als moderne selbstzündende Motoren. Eine Direkteinblasung des Erdgases in den Zylinder und ein Kompressions-Verhältnis von 12 (9) stellen aber Möglichkeiten dar, um die Energieeffizienz von Erdgasmotoren zu verbessern (10).

Die Verwendung von Wasserstoff in Bussen wurde trotz bisher sehr hoher Kosten und technischer Probleme mit großem Enthusiasmus vorangetrieben (Reykjavik, Berlin, Hamburg (11)). Die in Brennstoffzellen erzielbaren elektrischen Wirkungsgrade sind bei einer *Tank-zu-Rad* (*Tank-to-Wheel*) Betrachtung mit 40 % derzeit geringer als die mit Diesel-Großmotoren erzielbaren maximalen Werte (12). Stationär laufenden Stromerzeuger von seriell elektrischen Antrieben (oder *Range Extender* von Batterie-elektrischen Fahrzeugen) können im Bestpunkt betrieben und dafür optimiert werden und erzielen daher eine hohe Effizienz. Einzeln betrachtet wären Brennstoffzellen (13) mit 60 % elektrischem Wirkungsgrad noch etwas besser als NFZ-Dieselmotore. Jedoch verschlechtert eine Elektrolyse bei der Herstellung des Wasserstoffs die Gesamtbilanz (*Well-to-Wheel*) wesentlich. Gleiches gilt für eine vorgelagerte Umwandlung von chemisch gebundener in elektrische Energie an Bord. So leidet die Energiebilanz bei der Umwandlung der Primärkraftstoffe bei einen in die SOFC integrierten Reformer (14), mehr durch einen vorgeschalteten Reformer (15). Die Gesamt-Energieeffizienz reiner Elektroantriebe hängt ebenso wesentlich von den Umwandlungswirkungsgraden der vorgelagerten Kraftwerke ab.

Die Nutzung von Dieselmotoren als *Fuel-Converter* zur Umwandlung in elektrische oder mechanische Energie bleibt also bis auf weiteres Stand der Technik, wobei sich die

Antriebssysteme mit Dieselmotor in Bezug auf die Elektrifizierung bzw. Hybridisierung des Antriebsstranges in Zukunft noch weiter in der Effizienz verbessern werden.

3.3 STAND DER TECHNIK DES HYBRIDANTRIEBES, SPEZIELL BEI BUSSEN

3.3.1 BEGRIFFSDEFINITION

Da der Begriff „Hybrid“ in unterschiedlichen Kontexten benutzt wird und nur „von zweierlei Herkunft“ bedeutet, muss der „**Hybridantrieb**“ für die nachfolgenden Betrachtungen genauer definiert werden. „**Hybridantrieb**“ bezieht sich hier auf einen Antrieb, der sowohl eine Verbrennungskraftmaschine VKM als auch eine weitere Antriebsmaschine umfasst, wobei zumindest ein Teil der mechanischen Energie für den Antrieb aus einem Energiespeicher kommt, der während des Bremsvorganges mit umgewandelter, von der Verzögerung des Fahrzeuges stammender, mechanischer Energie aufgeladen wird. Es gibt, selbst wenn der Energieträger (elektrisch, pneumatisch, mechanisch in verschiedenen Formen) für die Speicherung auf die Nutzung der Elektrizität eingeschränkt wird, mannigfaltige Variations- und Kombinationsmöglichkeiten für Hybridantriebe. Oberleitungsbusse mit alternierendem Diesel- und elektrischem Betrieb (von der Oberleitung), wie sie im öffentlichen Nahverkehr zum Einsatz kommen, werden hier nur indirekt behandelt. Deselelektrische Antriebe, die bauarttypisch keine Energiezwischenspeicherung besitzen, haben ansonsten im Antriebsteil eine sehr große Ähnlichkeit zu den hier behandelten seriell-elektrischen Antrieben.

3.3.2 GESCHICHTE UND MARKTÜBERBLICK

Es gibt den Hybridantrieb bereits seit ca. 1919 im Motorsport (16). In der näheren Vergangenheit wurde der Hybridantrieb 1977 in Einzelfahrzeugen von *Volkswagen* getestet (17), *Audi* hat 1989 den *Audi 100 quattro* als Hybridfahrzeug umgerüstet, wobei die Antriebe beide Achsen getrennt bedienen (Hinterachse mit 9,3 kW Gleichstrom-Elektromotor, Vorderachse VKM) (18) (19). Dieses einfache Konzept wird auch als *hybrid-over-the-road* bezeichnet, wo eine Achse elektrisch und die andere Achse über eine VKM angetrieben wird. Die Kraft zur Überwindung des Fahrwiderstandes wird also erst bei Addition der Kräfte beider Achsen erreicht (20), während die Rekuperation nur über eine einzige Achse erfolgt. 1997 hat *Audi* auch den *A4 Avant* mit parallel-hybridem Antrieb angeboten, stellte aber die Fertigung wieder ein (21). Der *Audi DUO* hatte ebenfalls einen parallel-hybridem Antrieb, und nutzte einen permanent erregten Synchronmotor mit 21/35 kW. Auch *Honda* setzte 1999 beim zweisitzigen ursprünglichen *Insight* auf ein Fahrzeug mit parallel-hybridem Antrieb, jedoch im Unterschied zum aktuellen gleichnamigen Fahrzeug mit deutlich modifiziertem Fahrzeugkonzept. Neben der Optimierung im Hinblick auf die Fahrwiderstände durch besserer Aerodynamik und Leichtlaufreifen, wurde damals ein stark modifizierter Dreizylinder-Motor eingesetzt (22). Die Produktion des Fahrzeuges wurde jedoch eingestellt, der Name für ein weniger unkonventionelles Hybrid-Fahrzeug des Herstellers weiter benutzt.

Toyota hatte 1995 sein kombiniertes serielles/paralleles Konzept THS im *Prius* vorgestellt. Seit 1997 (Verkaufsbeginn in Japan (23)) wird das THS II nun 2014 in der dritten Fahrzeuggeneration erfolgreich verkauft, und auch für verschiedene Fahrzeuge der *Toyota*-Gruppe wie *Lexus* verwendet. *Toyota* bietet das Antriebskonzept über eine Tochterfirma nun auch für andere Marken an (z. B. *Mazda*, *Ford* (24), *BMW*). Eine *Plug-In-Hybrid*-Version (PHEF) des *Prius* mit Nachlademöglichkeit vom Stromnetz wurde, wie auch viele Elektrofahrzeuge, zuerst nur in Kalifornien angeboten (25), ist nun 2014 aber auch in Europa erhältlich.

Mercedes-Benz bietet bzw. bot mit dem *Hybrid-Sprinter* ebenso wie *IVECO/Micro-Vett* mit dem BIMODALE ein Fahrzeug mit Hybridantrieb für den innerstädtischen Lieferverkehr an (26).

Durch die Einfachheit der Umsetzung wird das *hybrid-over-the-road*-Konzept nun wieder und insbesondere für Diesel-Vans aufgegriffen (27). Volkswagen hat mit dem *twin up!* ein hybrides Konzept entwickelt, das durch eine Trennkupplung während des Stillstandes Strom erzeugen kann (28), ein Ansatz der für gewerblich genutzte Fahrzeuge interessant ist.

Die industrielle Tangente spielt beim Markteintritt innovativer Systeme eine wichtige Rolle. Bei den, so genannten, milden Hybridantrieben werden teilweise auch nur der Starter und die Sekundärbatterie (Akkumulator) im Vergleich zum konventionell angetriebenen Fahrzeug vergrößert. Der Starter dient gleichzeitig als Generator und ersetzt die Lichtmaschine. Damit kann der Massenzuwachs, und können aber auch die notwendigen Entwicklungskosten und Adaptierungen der Fertigungsstraßen und Lieferketten in Grenzen gehalten werden. Die Kraftstoffeffizienz verbessert sich bei einer geringen Spitzenleistung der elektrischen Maschine und damit geringer Rekuperationsmöglichkeit im Stadtverkehr jedoch nur wenig. Volkswagen ging auch versuchsweise den Weg, das Schwungrad im Getriebe durch einen 35 kW Elektromotor zu ersetzen (28), Peugeot hat 2013 ein hydraulisches Konzept mit komprimierter Luft als Energiespeicher vorgestellt (29).

Um die Entwicklungskosten für hybride Antriebslösungen zurückverdienen zu können, sind entsprechende Erlöse (Verkauf und *after sales*) nötig. Die in Europa produzierte Stückzahl für **Busse im ÖV** ist, im Vergleich zur Zahl verkaufter Pkw, mit ca. 16.000 pro Jahr (30) sehr gering. Da aber der Umsatz bei Bussen pro Fahrzeug eine Zehnerpotenz höher als bei Pkw ist, könnte sich beim in Ballungsräumen wachsenden Öffentlichen Nahverkehr ein interessanter Markt für energieeffiziente und umweltfreundliche Antriebslösungen ergeben. Im Bereich Stadtbusse ist die Nähe von seriell-hybriden Konzepten zu Oberleitungsbussen nutzbar, um ein kostensparendes Gleichteilekonzept (31) aufsetzen zu können. Möglicherweise hat die Nutzung generischer Komponenten die Entwicklung von Hybridantriebskonzepten im Busbereich beschleunigt. Voith bietet mit der *Elvodrive* eine Einheit an, die unabhängig vom verwendeten Speicher für das Energiemanagement eingesetzt werden kann (32).

Die im Vergleich zu seriell-hybriden leichteren leistungsverzweigten Konzepte benötigen aufgrund des höheren Entwicklungsaufwandes größere Stückzahlen um eine Wirtschaftlichkeit über Skaleneffekte (*economy of scale*) erzielen zu können. Damit wären hybride Antriebe für **Kleinbusse**, die auf denselben Plattformen aufbauen, wie Transporter, am ehesten darstellbar. Dabei könnten bei größeren Stückzahlen auch parallel-hybride oder leistungsverzweigte hybride Antriebskonzepte (siehe Kap. 3.3.5) mit hohen elektrischen Antriebs- und auch Rekuperationsleistungen zum Einsatz kommen. Bei großen Bussen gibt es die Alternativen, Batterieelektrische Busse mit einem Stromerzeuger, und geringeren Kapazitäten für Sekundärbatterien auszurüsten, oder ein Nachladen über Oberleitung zu ermöglichen (33). Oberleitungsbusse hatten auch in der Vergangenheit manchmal kleinere Stromerzeuge (über VKM-angetriebenen Generatoren) für den Notfall an Bord (34).

Für **Spezialfahrzeuge** ist kaum mehr eine Massenfertigung möglich, da die Stückzahl noch kleiner ist. Die TU Graz hat im Projekt *GPA non-road* elektrische parallele-hybride Antriebsstränge für Off-Road Anwendungen untersucht (35). Große Muldenkipper haben einen hydraulischen Antrieb und mobile Arbeitsmaschinen bieten sich ebenso für ein hybrides wenn auch hydraulisches Antriebskonzept an (36). Hier können die Erfahrungen aufgegriffen werden, die in den USA mit hydraulischen Hybridantriebslösungen gemacht wurden (37) (38) (39) (40) (41). Im Bereich **Stadtbusse** hat *Mercedes-Benz* 1969 ein elektrisch angetriebenes Versuchsfahrzeug gebaut, bei dem die Blei-Säure Akkus über einen Stromerzeuger mit einem Vierzylinder Dieselmotor mit einer Maximalleistung von 48 kW gespeist wurden. Die elektrische Antriebsleistung betrug 115 kW bis 150 kW (42). Die Entwicklungen haben sich in Serienmodellen der

(bimodalen) *DUO-Busse* niedergeschlagen, die neben der Stromversorgung über die Oberleitung einen eigenen Stromerzeuger an Bord besaßen. Mitte der Neunziger Jahre wurde von *Mercedes-Benz* auch ein erstes seriell-hybrides Buskonzept mit Nabenmotoren getestet. *Daimler Buses North America* fertigte bis 2012 einen, 1996 vom ehemaligen kanadischen Staatsbetrieb *ORION* entwickelten, Hybridbus mit seriellem Hybridantrieb. Aufgrund von hohen Förderungen in den USA sind diese Fahrzeuge bereits seit 1998 (43) zahlreich im Einsatz. In Summe waren 2008 in den USA 3 % der Busflotte (mit Lösungen von *GM-Allison*, von *Daimler Buses North America/ORION* oder *BAE*) mit einem Hybridantrieb ausgerüstet (44), 2010 waren es 6.000 von 64.000 Bussen insgesamt, also ca. 9 %. Die *ORION*-Fabrik in Kanada wurde 2012 geschlossen (45) und die Geschäfte an *New Flyer Industries Inc.* übertragen, die das *BAE HybriDrive-System* (46) einsetzen. *Daimler* hatte auch in Japan unter der Marke *Fuso* ab 2002 Hybridbusse mit zur nordamerikanischen Technik ähnlichen Antriebssystemen im Testbetrieb laufen. In Europa hat *MAN* 1975 begonnen einen Schwungrad-Speicher in einem Hybridbus zu testen, 1985 einen hydraulischen Speicher und ab 2001 parallel NiMH-Akkus und Elektrochemische Doppelschicht Kondensatoren EDLC (auch als *Ultracaps*, *Supercaps* oder *Electric/Electrochemical/Electrolytical Double Layer Capacitors* bezeichnet) eingesetzt (47). Das immer noch aktuelle Hybridantriebskonzept von *MAN* für Linienbusse wird in Kooperation mit *Siemens* weiter entwickelt (48). Ein Prototyp-Fahrzeug war 2005 im Linieneinsatz bei der *VAG Nürnberg* (49). Mittlerweile sind diese Konzepte in der Serie verfügbar. Es waren in Europa 2012 auch mehrere Dutzend dieser Busse im Einsatz. Die Verbreitung der Hybridbusse ist in Europa im Vergleich zu den USA aber noch gering.

Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der publizierten Leistungsdaten der seriell-hybriden Antriebe von Stadtbussen:

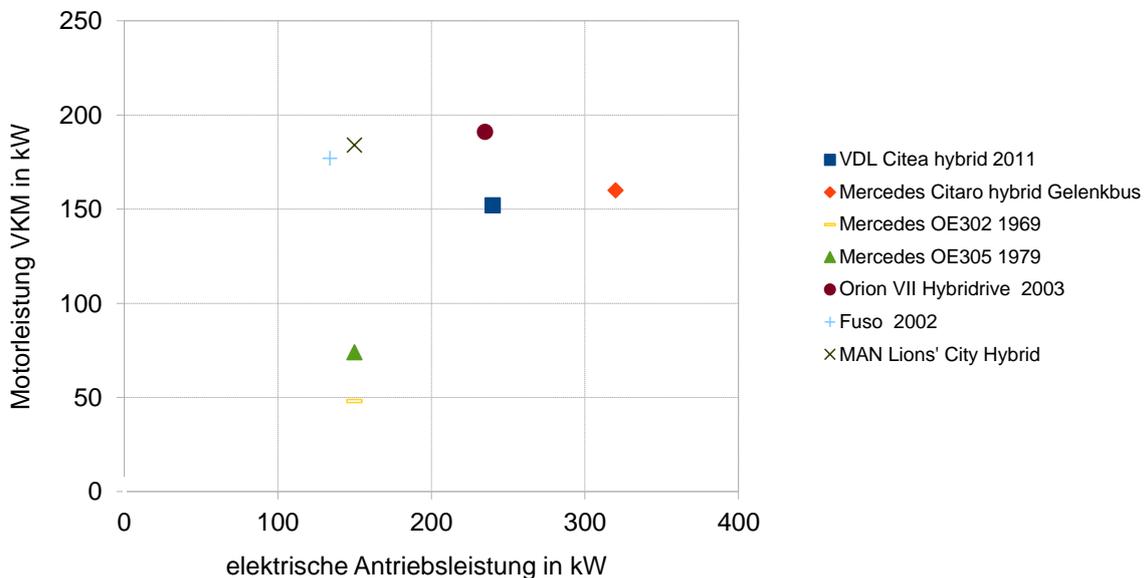


Abbildung 1: Überblick Motorleistungen seriell-hybrider Busse für Verbrennungskraftmaschine im Motor-Generator-Satz und Elektroantrieb (eigene Zusammenstellung aus mehreren Quellen (47) (48) (49) (50) (51) (52) (53) (54))

Die elektrischen Antriebsleistungen der seriell elektrischen Hybridbusse haben sich zuletzt auf über 300 kW vergrößert, besonders in Gelenkbussen (mit 4 Nabenmotoren). Die mechanischen Leistungen der VKM im Generatorsatz, die im Betrieb mit größeren Speichern nur die mittlere Leistung beistellen müssen, sind hingegen wieder leicht gesunken und liegen nun knapp über 150 kW (siehe Formel 5). Die geringere Leistung der VKM ist der deutlichste Unterschied zum

dieselelektrischen Antrieb, welcher im *Cito* von *Mercedes* 1999 (50) (51) auf den Markt gebracht wurde und später wieder verschwand.

Bis zuletzt waren noch sehr verschiedene parallele, serielle oder kombinierte Ansätze für die Hybridisierung von Busantrieben in der Testphase (55). Größere Einzelbestellungen existieren bisher nur für parallel hybride Busse z. B. 27 *Volvo* 7700 Hybrid-Busse für Dordrecht (56) und 60 Busse für Curitiba (57), wobei Anfang 2013 über die *Volvo* Niederlassung Nova Bus in Quebec Kanada vom Zusammenschluss von Verkehrsunternehmen *ATUQ* 475 Busse bestellt wurden (58). *Volvo* hatte Anfang 2013 damit über 1.000 Busse mit parallel-hybridem Antriebssystem (System *I-SAM*) verkauft (59). Andere Städte-übergreifenden Vorhaben, wie die ARGE *RegioHybrid* (60) haben 24 *MAN Lion City* Hybrid-Busse bestellt. Die bisher größte Bestellung erfolgte aber 2013 über *Keolis Sverige AB* mit 52 Hybridbussen (61). In London wurden 70 Busse unterschiedlicher Hersteller und damit auch mit unterschiedlichen Konzepten getestet (62). Anfang 2012 fuhren in London 153 seriell hybride und 72 parallel-hybride Busse (63). Neue Bestellungen haben das Ziel der Beschaffung von insgesamt 1.000 Hybridbussen bis 2016 (64). Der Verkehrsanbieter *RATP* in Paris hat sowohl ein *Hynovis* genanntes hydraulisches Hybridantriebskonzept von *Irisbus Iveco*, als auch den seriell-hybriden Antrieb von *MAN* getestet (65) und von letzterem 2013 15 Stück bestellt (66).

3.3.3 VERGLEICH DER HYBRIDKONZEPTE

Beim parallel-hybriden Antriebssystem, und auch teilweise bei den später besprochenen Systemen mit Leistungsverzweigung zwischen VKM und Elektromaschinen, ist eine größere Nähe zu herkömmlichen Antriebssystemen gegeben, als beim seriell-hybriden Antriebssystem. Zwar kann bei parallel-hybriden Konzepten die VKM auch verkleinert und ihr Lauf beruhigt (phlegmatisiert) werden, jedoch gibt es Betriebszustände, wo die VKM einen großen Teil der Antriebsleistung über eine mechanische Verbindung von der VKM zur Antriebsachse abdeckt. In Summe mit anderen Maßnahmen am Fahrzeug kann auch bei parallel-hybriden Antrieben eine signifikante Einsparung im Vergleich zum herkömmlichen Antrieb ausschließlich mit VKM erzielt werden, wenn Elektromaschine und Energiespeicher entsprechend groß ausgelegt sind. *Volvo* verbaut z. B. beim *I-SAM* System (67) (68) eine 160 kW VKM, eine elektrische 120 kW Maschine und einen LiFePO₄-Akku mit 4,8 kWh. Im Langstreckenverkehr im teilweise kreuzungsfreien Straßennetz haben parallel-hybride Konzepte auch bei niedrigeren elektrischen Leistungen, durch die geringere Fahrzeugmasse und die direkte Verbindung zwischen VKM und Rädern Effizienzvorteile gegenüber seriell-hybriden Konzepten, weil auf direktem Wege mechanische Energie der VKM auf den Antrieb übertragen wird und die zweimalige Umwandlung der Energie (VKM zu Generator bzw. Energiespeicher und Energiespeicher über Elektromotor zu den Rädern) entfällt. Diesen Ansatz nutzt z. B. auch das Antriebskonzept von *GM* im *Volt* bzw. *Opel Ampera* (69). Für eine signifikante Rekuperation von Verzögerungsenergie z. B. bei längeren Gefällestrecken ist eine übliche Speichergröße bei Bussen mit parallel-hybridem Antrieb von z. B. 0,5 kWh (70) nicht ausreichend, weil dies bei einer schweren Masse von 15 t nur der Energie für die Überwindung einer Höhe von ca. 12 m entspricht.

3.3.4 SERIELL-HYBRIDE ANTRIEBSSYSTEME

Serielle Hybridsysteme, wie in der folgenden Abbildung 2 schematisch gezeigt, haben zwischen Verbrennungskraftmaschine und Antriebsrädern keine mechanische Verbindung. Die von der VKM stammende mechanische Energie wird im elektrischen Generator in elektrische Energie umgewandelt. Der Überschuss an elektrischer Energie, über die für Antrieb und vom elektrischen System benötigte Menge hinaus, wird dem elektrischen Energiespeicher zugeführt. Bei einer negativen Bilanz zwischen der für Antrieb und elektrischem Systeme erforderlichen

und der vom Motor-Generator-Satz eingespeisten elektrischer Energie, wird die Differenz dem Energiespeicher entnommen. Das System, das in Abbildung 2 gezeigt wird, kommt also durch die elektrische Leistungsübertragung ohne Kupplungen (und Schaltgetriebe) aus. Die hier vorgestellte Variante mit Zentralantrieb zeichnet sich dadurch aus, dass die als Motor und Generator arbeitende Elektromaschine nicht nabennah montiert ist und über ggf. ein Getriebe, aber zumindest über eine Welle und ein Differenzial mit den Rädern verbunden ist.

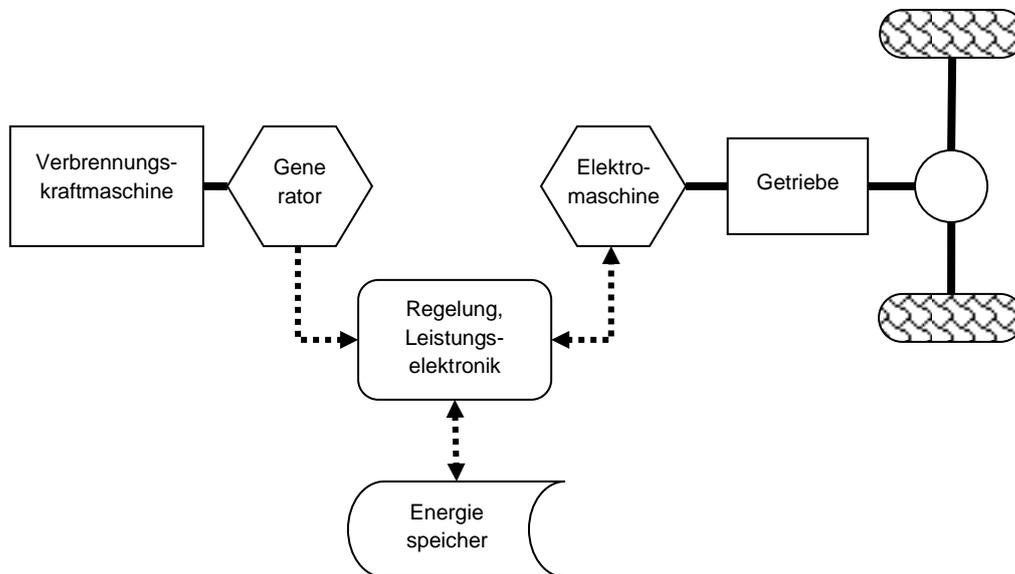


Abbildung 2: Leistungsflüsse serieller Hybridantrieb mit Zentralantrieb und Getriebe

Durch das Vorhandensein von zwei elektrischen Maschinen beim seriell-hybriden Antrieb, wovon die mit den Rädern verbundene elektrische Maschine im Unterschied zu parallel oder leistungsverzweigten hybriden Konzepten für die maximale Fahrleistung ausgelegt werden muss, erhöht sich die Fahrzeugmasse und damit indirekt auch die erforderliche Antriebsleistung (71). Die Nennleistungen der Verbrennungskraftmaschine, sowie des mit ihr gekoppelten Generators, liegen beim seriell-hybriden Antrieb etwas unter der der Antriebsmaschine. Die genaue Auslegung bestimmt sich durch das Regelungskonzept und die Größe des Energiespeichers. Im Stadtverkehr mit transienten Zyklen soll der Ladezustand des Energiespeichers (*State-of-Charge* SOC) immer auf einem solchen Niveau gehalten werden, dass eine volle Rekuperation bei der jeweiligen Geschwindigkeit möglich ist. Damit kann die Bremsenergie besser ausgenutzt werden und der Stromerzeuger kann dabei länger in einem verbrauchs-günstigeren Betriebspunkt laufen. Auf der anderen Seite muss immer so viel Energie vorgehalten werden, dass eine Anfahrrampe mit der geforderten Beschleunigung bis zum Zeitpunkt gefahren werden kann, ab dem die für den Antrieb erforderliche elektrische Leistung unter die elektrische Leistungsabgabe des Motor-Generator-Satzes sinkt.

Serielle Hybridsysteme fördern bei Nutzfahrzeugen einen Umstieg auf einen elektrischen Antrieb für Luftpresser, Lenkhilfpumpe und Klimaanlage. Türsysteme können auch in elektrischer Ausführung bestellt werden. Bei der Beheizung des Innenraumes kann sich bei längeren Stillständen der VKM, die fehlende Abwärme der VKM bemerkbar machen, die nicht durch die sehr geringe Abwärme der elektrischen Aggregate ausgeglichen werden kann. Es kann aber zur Energie-effizienten Heizung eine Klimaanlage im Wärmepumpenbetrieb (72) zum Einsatz kommen. Eine geringe Energieeinsparung ist über die Unterbrechung der Heizung bei geöffneten Türen während Haltestellen möglich. Eine bessere Isolierung der Fenster (Doppelscheibenverglasung) zur Verringerung der Wärmeverluste erhöht zwar über das Mehrgewicht den Fahrwiderstand, verringert aber die Wärmeverluste (und einen Beschlag der

Scheiben) wesentlich. Der Mehrverbrauch über das Mehrgewicht der Doppelscheiben wird über die Rekuperation der Bremsenergie in Grenzen gehalten werden. Wenn Abwärme aus dem taktenden Stromerzeuger kontinuierlich zur Verfügung stehen soll, bietet sich u.U. die Nutzung eines (z. B. latenten) Wärmespeichers an.

3.3.5 LEISTUNGSVERZWEIGTE HYBRIDANTRIEBE

Beim hybrid-elektrischen Konzept mit Leistungsverzweigung kann mechanische Energie von der Verbrennungskraftmaschine sowohl direkt für den Antrieb der Räder, als auch über einen mit der VKM verbundenen Generator zur Einspeisung von elektrischer Energie in den Energiespeicher benutzt werden. Der Hybridantrieb ohne Leistungsverzweigung kommt mit nur einer elektrischen Maschine aus, die alternativ als Motor oder Generator betrieben wird. Das Vorhandensein von Generator und Elektromotor (also zwei elektrische Maschinen, sowie einer Vielzahl an Kupplungen) bei dem in Abbildung 3 schematisch gezeigten leistungsverzweigten Konzept, bedeutet auch eine erhöhte Fahrzeugmasse im Vergleich zum rein parallel-hybriden Antriebskonzept. Bei der leistungsverzweigten hybriden Antriebsvariante sind jedoch die Leistungen der elektrischen Maschinen, bei einer Beschränkung des rein elektrischen Betriebs auf geringe Geschwindigkeiten, kleiner als die maximale Antriebsleistung und damit auch die Massen kleiner als beim seriell-hybriden Antrieb (bei Annahme identer Masse des Energiespeichers bei beiden Konzepten).

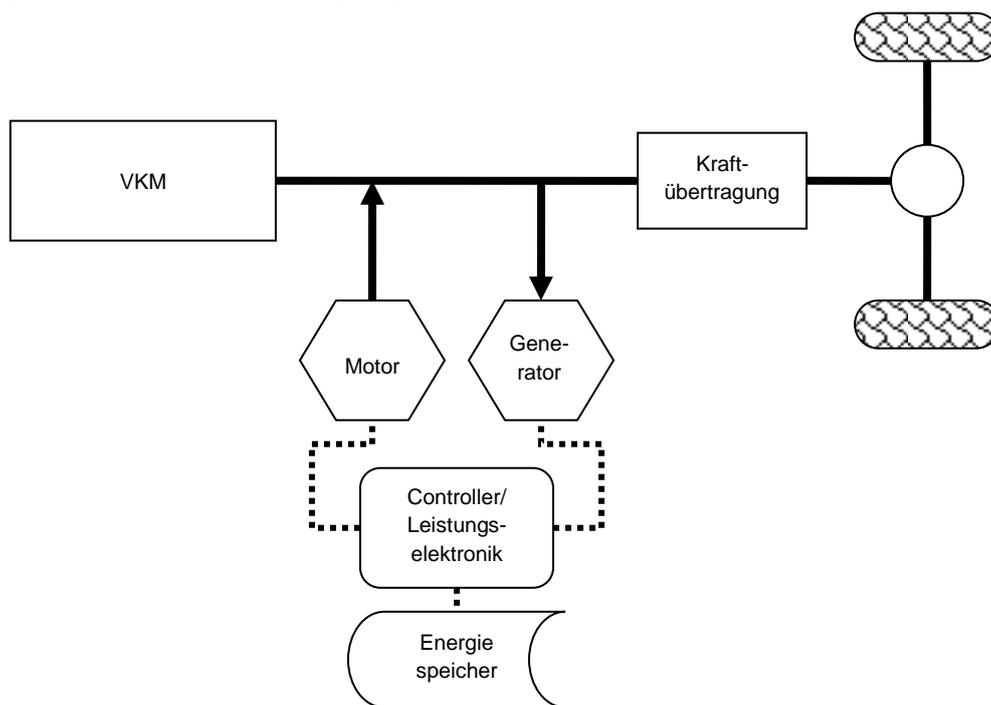


Abbildung 3: Leistungsflüsse Hybridantriebskonzept mit Leistungsverzweigung

Durch hohe Spannungen (und Drehzahlen) können die Massen der elektrischen Maschinen reduziert werden. Beim *THS* von *Toyota*, das in Abbildung 4 gezeigt wird, wurde die Sekundärbatterie zuerst nur mit einer Spannung von 220 V bis 274 V betrieben, während nun beim *THSII* generell auch bei Motor/Generatoren (mit statt 50 kW Nennleistung nun 60 kW) maximal 500 V benutzt wird (73). MG1, also der eigentliche Generator hat eine geringere Leistung, die nicht offiziell genannte Nennleistung scheint 25 kW (74) oder nun 37,8 kW (75) zu sein.

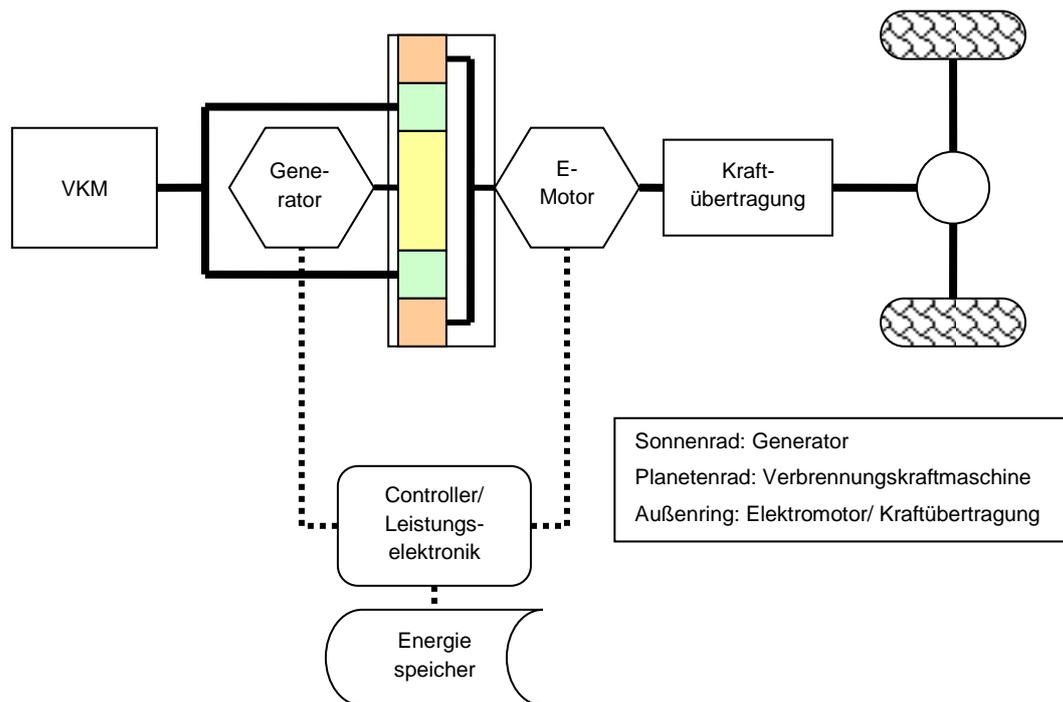


Abbildung 4: Hybridantriebskonzept mit Leistungsverteilung im Planetenradgetriebe (Toyota Hybrid Synergy Drive)

GM setzt ein Antriebssystem namens *VOLTEC* ein, das mechanisch ähnlich einem leistungsverzweigten System mit Leistungsaddition im Planetengetriebe ist, wobei aber nur eine einzige elektrische Maschine vorhanden ist. Dies verringert das Gewicht, ermöglicht aber kein Nachladen des Energiespeichers während der Fahrt aus der VKM (69).

Im Gegensatz zum System mit einem Planetengetriebe von *Toyota* und *Ford* benutzen *GM/Allison* und *Renault* zwei Planetengetriebe. Dadurch wird es möglich Elektromotor/Generator in einem kleineren Drehzahlbereich zu betreiben und die Entstehung von so genanntem Blindstrom (76) beim ungewollten generatorischen Betrieb einer der zwei vorhandenen elektrischen Maschinen zu vermeiden. Beide elektrischen Maschinen können dann ohne große Effizienzverluste als robuste Induktionsmaschinen (Asynchronmaschine) ausgeführt werden (77). In Abbildung 5 wird ein in den USA von *Allison* für Busse entwickelter (78) komplexer leistungsverzweigter Antrieb gezeigt, der auf einem parallel-hybriden System basiert. Bemerkenswert ist die mit 75 kW angegebene (79) geringe nominelle Leistung des Motors/Generators M/G, die kurzzeitige Überlastung beim *KC Metro New Flyer* von *Allison Buses* würde bis 150 kW betragen.

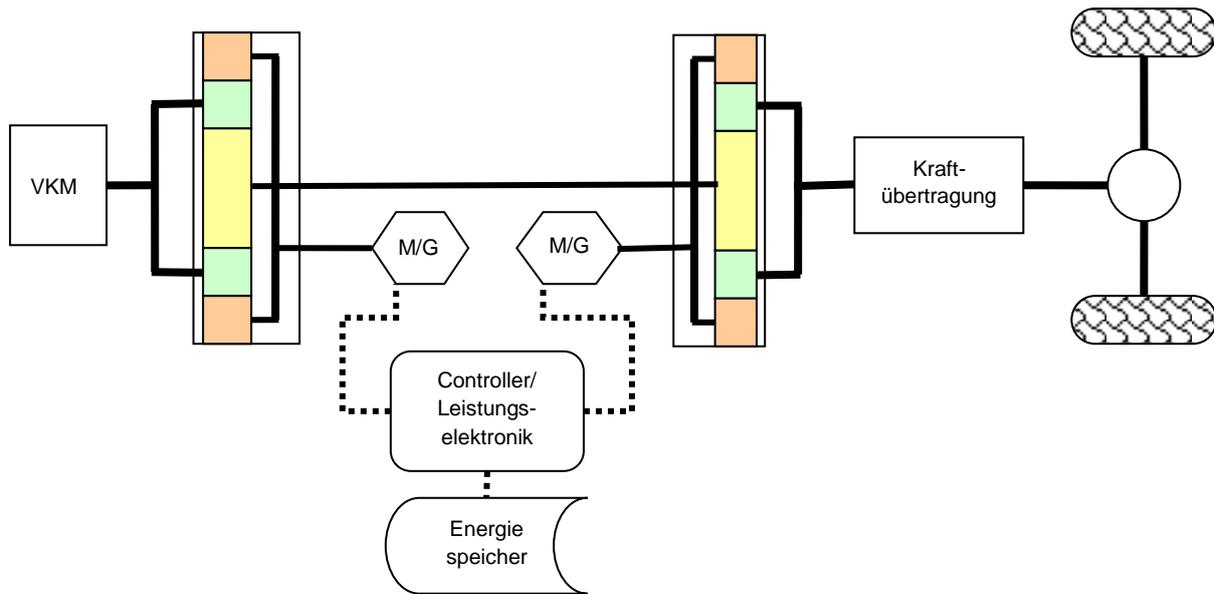


Abbildung 5: Parallel-hybrides Antriebskonzept mit Doppel Planetenradsystem AHS-2 (77)

Radnabenantriebe mit Direktantrieb der Räder vermeiden verschleiß- und verlustbehaftete Getriebe, die Effizienz der elektrischen Maschinen ist aber i. d. R. geringer. Die geringere Maschinendrehzahl führt zu größeren Strömen und damit auch zu schwereren elektrischen Maschinen (siehe auch Abbildung 25). Es wurde beispielsweise eine Gleichstrom-Synchronmaschine in einen *super-single* LKW-Reifen eingebaut, um auf ein Getriebe verzichten zu können (80). Die anfänglich großen Raddurchmessern von 136 cm (81), wurden bei der Weiterentwicklung verringert, und es werden anstatt von 10 kg pro kW Nennleistung (82) mit einer Untersetzung nach eigener Aussage nun spezifische Massen von ca. 1 kg pro kW erzielt (83). Damit kann der dem Konzept innewohnenden Nachteil der hohen ungefederten Massen (84) verringert werden. Ein Radantrieb mit vier kleineren Motoren (bzw. bei Gelenkbussen auch maximal sechs) würde eine Aufteilung der Kräfte ermöglichen, was besonders für das rekuperative Bremsen auf glattem Untergrund von Vorteil wäre. Ein Einzelradantrieb bringt aber eventuell auch höhere Verluste durch die kleineren Leistungen der Radmotore mit sich. Mercedes testet seit 2010 einen Gelenkbus mit vier Nabenmotoren (85) (86). Diese Busse wurden 2012 noch einzeln an die Verkehrsbetriebe übergeben (87). *Econex Co Ltd.* verfolgt den von *e-traction* initiierten Weg der Nabenmotore für Busse und leichte LKWs mit einer Fabrik für Nabenantriebe in Korea (88) weiter, die Technik wird auch von VDL im *Citea Electric* verwendet (89).

4 FAHRZEUGMODELLIERUNG FÜR DIE SIMULATION

4.1 EINLEITUNG

In diesem Kapitel werden die **Grunddaten des Fahrzeuges**, für das der Betrieb des seriell-hybriden Antriebs simuliert werden soll, definiert. Da die Simulation für einen innerstädtischen Streckenabschnitt in Graz erfolgte, konnte die Längsdynamik ohne Steigungswiderstand und auch ohne Windeinfluss berechnet werden.

4.2 FAHRZEUGCHARAKTERISTIK LÄNGSDYNAMIK

Für die Längsdynamik des Fahrzeuges summieren sich, wie in Formel 1 gezeigt, Luft-, Roll- und Beschleunigungswiderstand zur longitudinalen Gesamtkraft auf das Fahrzeug. Infolge der höheren Ungenauigkeit der GPS-Höhenangabe (die Rohdaten der Messung zeigen Höhen bis über 500 m, siehe auch (90) und Abbildung 81) konnten keine Steigungen bzw. kein Steigungswiderstand ermittelt werden, was angesichts der augenscheinlichen Flachheit der Strecke vertretbar war. Mit den berechneten Fahrwiderständen nach Formel 1 werden die erforderliche mechanische Antriebsleistung, sowie die mögliche mechanische Rekuperationsleistung bestimmt.

Formel 1: Längsdynamik für die Fahrzeugsimulation

$$F_{ges} = F_L + F_R + F_B$$

$$P_{antr} = F_{ges} v$$

F_L	Luftwiderstand (Kraft) in N
F_R	Rollreibungswiderstand (Kraft) in N
F_B	Beschleunigungswiderstand (Kraft) in N
F_{ges}	Fahrwiderstand (Kraft) in N
P_{antr}	erforderliche Antriebsleistung in W
v	translatorische Geschwindigkeit des Fahrzeuges in m / s

Im Folgenden wird die Berechnung der drei Fahrwiderstände getrennt für den modellierten Stadtbus detailliert.

4.2.1 LUFTWIDERSTAND

Die Berechnung des **Luftwiderstandes** des seriell-hybriden Stadtbusse bei der Berechnung des Fahrwiderstandes erfolgte nach Formel 2.

Formel 2: Berechnungsformel und Annahmen Luftwiderstand seriell hybrider Stadtbus für die Berechnung

$$F_L = c_w \cdot A_q \cdot v \cdot |v| \cdot \frac{\rho}{2}$$

F_L	Luftwiderstand (Kraft) in N
$c_w = 0,79$	Luftwiderstandsbeiwert, dimensionslos
$A_q = 6,4 \text{ m}^2$	Anströmfläche (Spantfläche mit Einbeziehen der Räder)
$\rho = 1,21 \text{ kg / m}^3$	Luftdichte (bei 5 °C, 360 m Seehöhe und 60 % relative Luftfeuchte)
v	Geschwindigkeit relativ zur (bewegten Luft)

Da in dieser Arbeit idente Fahrten mit unterschiedlichen Regel-Algorithmen simuliert werden, kann für den Vergleich der Algorithmen, vereinfachend die von der Seehöhe und Temperatur (bzw. auch Luftfeuchte) abhängige Luftdichte als konstant angenommen werden. Darüber hinaus hat der Luftwiderstand bei Stadtbusen wegen der geringen Geschwindigkeiten nur einen sehr kleinen Anteil am Fahrwiderstand (siehe Abbildung 9 und Abbildung 10). Daher sind

auch die Genauigkeitsanforderungen bei der Festlegung des Luftwiderstandsbeiwerts gering. Es wurde für $c_w \cdot A_q$ ein im Vergleich zur Literatur ($3,7 \text{ m}^2$ (91)) höherer Wert von ca. 5 m^2 angenommen (siehe Zahlenwerte Tabelle 2), da aus Platzgründen die großvolumigen Energiespeicher am Dach montiert werden (wie auch bei den Konzepten von MAN und Mercedes sichtbar) und weil in der Simulation größere Speicher angenommen wurden, als derzeit von den Herstellern verbaut werden.

4.2.2 ROLLWIDERSTAND

Der **Rollwiderstand** muss bei Nutzfahrzeug-Reifen mit einem von der Geschwindigkeit abhängigen Widerstandskoeffizienten berechnet werden. Abbildung 6 zeigt einen Verlauf der Rollwiderstandsbeiwerte über die Geschwindigkeit, wobei die ersatzweise für zwei verschiedene LKW-Reifen benutzten Messwerte aus der Literatur (92) extrapoliert wurden. .

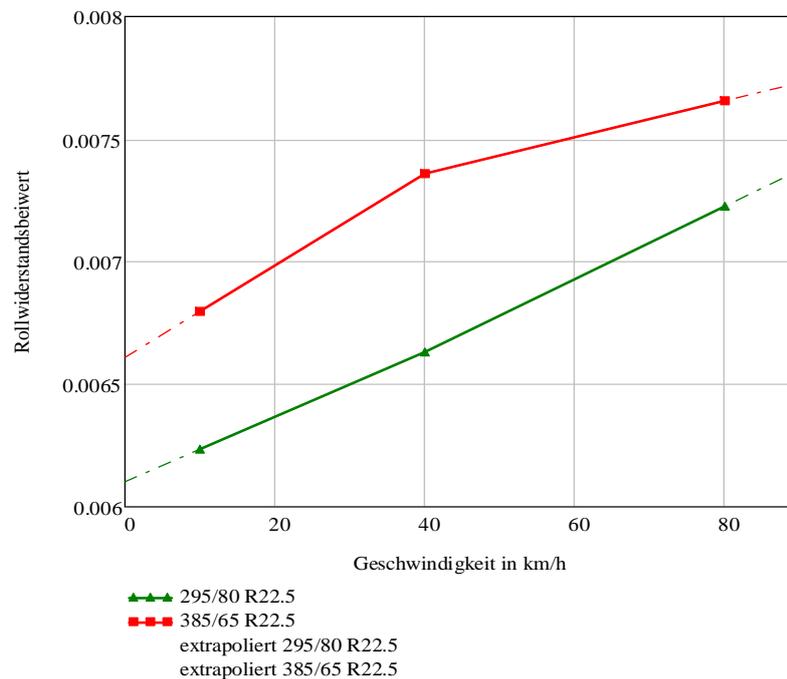


Abbildung 6: Vergleich Rollwiderstandsbeiwert für verschiedene Reifenquerschnitte in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Daten (92) extrapoliert

Der von der Geschwindigkeit abhängige Term für den Rollwiderstand wird auch über die Rauheit der Fahrbahnoberfläche beeinflusst. Dies muss, ebenso wie Einflüsse, die von Temperatur und Makrotextur der Fahrbahn abhängen, nicht berücksichtigt werden, da in der Simulation Fahrten unter identen Umständen auf identen Strecken verglichen werden. In der Simulation wurde der Ansatz nach Formel 3 für den Rollwiderstandsbeiwert verwendet, wobei die Faktoren der Größengleichung für durchschnittliche Asphaltqualität und Radialreifen angenommen wurden.

Formel 3: Formel Rollwiderstand, Größengleichung und Faktoren zur Berechnung des Rollwiderstandsbeiwertes (93)

$$F_R = \mu_r(v) \cdot m_g \cdot g$$

$$\mu_r(v) = \frac{9,8066 C_r}{1000} (c_2 v + c_3)$$

- F_R Rollwiderstand (Kraft in N)
- $\mu_r(v)$ Rollwiderstandsbeiwert als Funktion der Geschwindigkeit
- m_g schwere Gesamtmasse (für die Gravitation) in kg
- v Geschwindigkeit in km / h

Konstanten für die Größengleichung:

$$C_r = 1,75 \text{ (93)}$$

$$c_2 = 0,04 \frac{1}{\text{km/h}} \text{ (93)}$$

$$c_3 = 5 \text{ (93)}$$

Einflüsse der Erwärmung der Reifen während der Fahrt auf den Rollwiderstand sind nicht zu berücksichtigen, da es sich um einen Teilausschnitt aus dem täglichen Einsatz mit bereits warm-gefahrenen Reifen handelt. Einflüsse der Kurvenfahrt (94), der dynamischen Laständerung, sowie eventueller betonierter gerillter Fahrbahnen bei Haltestellen o. ä. auf den Rollwiderstand wurden in der Simulation vernachlässigt.

4.2.3 MASSEN

Es wird zwischen schwerer und träger Masse differenziert. Da der Beschleunigungswiderstand für die Antriebsleistung entscheidend ist, muss beim Vergleich von Regelungskonzepten die **Nutzlast** für alle berechneten Regelungsvarianten konstant gehalten werden. Untersuchungen können aber auch mit variablen Fahrgastzahlen durchgeführt werden (siehe Abbildung 73).

Für den Drehmassenzusatzfaktor, der die **Massenträgheitsmomente des Antriebsstranges** d. h. die Drehmasse berücksichtigt, wurden 10 % der schweren Masse angesetzt (siehe Formel 4), da die drehenden Teile wie Getriebe und der Elektromotor beim simulierten seriell-hybriden Antrieb fest mit den Rädern gekoppelt sind.

Formel 4: Formel Beschleunigungswiderstand

$$F_B = (m_{Fz} + m_{pers} + m_{red}) \cdot a$$

- F_B Beschleunigungswiderstand
- m_{Fz} schwere Fahrzeugmasse inkl. Betriebsmitteln
- m_{pers} (schwere) Masse der Insassen (Personen)
- m_{red} träge Zusatzmasse aus der Summe der transformierten Massenträgheitsmomente im Antriebsstrang (Annahme 10 % der schweren Masse)
- a Längsbeschleunigung Fahrzeug

Für das An- und Abstellen des Stromerzeugers, der nicht mit den Rädern verbunden ist, wurde eine separate Energiebilanz für die Trägheit aufgestellt und auch separat in der Simulation berücksichtigt, da dies unabhängig von der translatorischen Bewegung ist (siehe Formel 9). In Summe wurden für die schweren und trägen Massen des simulierten Stadtbusses (vgl. auch (95)) die Daten aus Tabelle 1 benutzt. Das Leistungsgewicht für den einbaufertigen Motor ohne Getriebe hängt ebenso wie beim Generator stark von der Nenndrehzahl ab, so wurden für die VKM Werte von 3 kg / kW bis 5,5 kg / kW gefunden (96):

Tabelle 1: Vergleich berechnete Fahrzeugmassen zwischen konventionellem und Hybridantrieb

Annahmen spezifische Massen:

Maschine	spezifische Masse (gerundet)
VKM	4,2 kg / kW VKM inkl. Nebenaggregate und Betriebsmittel vgl. (97) 1,6 kg / kW Getriebe (98) abzüglich 90 kg für das automatische Getriebe
elektrische Maschinen PMSM	2,2 kg / kW (99)

Mit den Annahmen berechnete Fahrzeugdaten:

Bezeichnung	Konventioneller Antrieb	Seriell hybrider Antrieb
Fahrzeugmasse	12.000 kg	13.276 kg
Reduzierte Masse (Drehmassenäquivalent)	1.200 kg	1.328 kg
Nutzlast	1.300 kg	1.300 kg
Summe träge Masse	14.500 kg	15.904 kg (+9,7 %)

Eine Unterscheidung der Massen ist nötig, da für die Berechnung des Rollwiderstandes mit der schweren Masse und für die Berechnung des Beschleunigungswiderstandes mit der trägen Masse gerechnet werden muss.

Es wurde angenommen, dass infolge der elektrischen Rekuperation auf das automatisch geschaltete Getriebe mit integriertem Retarder verzichtet und damit 90 kg eingespart werden kann. Es ist beim Vergleich der Massen auch zu berücksichtigen, dass moderne Stadtbusse mit Klimaanlage mit bis zu drei Generatoren, mit in Summe z. B. 300 A für 24 V (100) ausgerüstet sind. Deren, infolge der geringen Spannung dieser Generatoren, relativ hohen spezifischen Massen, können beim seriell elektrischen Hybridantrieb reduziert werden. Daher erhöhen die für den Hybridantrieb zusätzlich erforderlichen Komponenten nicht 1 : 1 die Gesamtmasse. Die Massenberechnung in Tabelle 1 ergibt, dass der seriell hybride Stadtbus fahrbereit, aber ohne Fahrgäste, eine um ca. 10 % höhere träge Masse besitzt, als das nicht hybride Referenzfahrzeug.

5 SYSTEMKOMPONENTEN SERIELL-HYBRIDER ANTRIEB

5.1 EINLEITUNG

In diesem Kapitel werden die Systemkomponenten des seriell-hybriden Antriebes charakterisiert, und deren Auswahl sowie Dimensionierung beschrieben. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer Untersuchung der Sensibilität dieser Angaben in Bezug auf den Fahrwiderstand. Die Berechnung der einzelnen Energieverluste der Systemkomponenten für die Simulation wird im nachfolgenden Kapitel 6 dargelegt.

5.2 SYSTEMÜBERSICHT SIMULIERTES SERIELL-HYBRIDES ANTRIEBSKONZEPT

Aufgrund der im Stadtverkehr zu erwartenden hoch transienten Fahrzustände und der daraus resultierenden potentiell rekuperierbaren Verzögerungsenergie, wurde ein rein **serielles hybrid-elektrisches Konzept** (101) mit großem Energiespeicher benutzt. Um eine gute Anwendbarkeit der Algorithmen für das Taktische Energiemanagement in einem Verkehrsunternehmen zu gewährleisten, wurden Fahrzeugdaten (siehe auch Kap. 4.2) aus einem realen Stadtbus für die Simulation verwendet (102). Im Folgenden werden dessen Systemkomponenten definiert. Die Kennwerte für das Fahrzeug wurden aus Daten abgeleitet, die für die erste Generation des MAN-Hybridbusses 2005 knapp vor dem Beginn der eigenen Simulationen publiziert wurden (49). Wo wegen der Anwendbarkeit des taktischen Energiemanagements oder der Datenverfügbarkeit (siehe Kap. 9.4.2) nötig, wurden im Simulationsmodell kleinere Änderungen bei den Eigenschaften der Komponenten im Vergleich zum ursprünglichen Design des MAN-Hybridbusses von 2005 vorgenommen.

Abbildung 7 zeigt die Komponenten des Simulationsmodells mit der Energieübertragung, die in Kap. 5.3 genauer beschrieben werden. Die VKM ist mit dem Generator gekoppelt, und beide werden zusammen als Black-Box simuliert. Ebenso werden die Daten der Wirkungsgrade des Antriebes mit benutzten Fahrkurven (siehe Kap. 8.2) vorberechnet. Dies bedeutet auch, dass kein Fahrermodell in der Simulation benötigt wird. Die antriebsseitigen Energieströme sind damit in Höhe und Zeitpunkt jeweils für eine Fahrt vordefiniert. Die aufgezeichneten und für die Simulation benutzten Fahrkurven (siehe Kap. 8.2) unterscheiden sich beim Energieumsatz zeitlich und in der Höhe, was auf den intermittierenden Betrieb des Stromerzeugers zum Nachladen des Energiespeichers Auswirkungen hat. Der Simulationskern fokussiert auf das taktische Energiemanagement für den Energiespeicher EDLC und die Berücksichtigung der variablen Verluste beim Laden und Entladen des EDLC und im Hochsetz- Tiefsetz-Steller. Die zusätzlichen elektrischen Verbraucher wurden beim Vergleich des taktischen Energiemanagements nicht simuliert. Es ist aber möglich größere zusätzliche Verbraucher in das Energiemanagement einzubeziehen, besonders solche Verbraucher bieten sich dafür an, die kurzfristig abschaltbar sind. So könnte in Abhängigkeit vom Ladezustand des EDLC die Klimaanlage kurzfristig abgestellt werden, wenn die Behaglichkeitsbedingungen nicht zu sehr verletzt werden. Die Schaltpunkte der Luftpresseur für die Druckspeicher wären auch gestaltbar, aber es wird versucht Türen etc. auf einen elektrischen Betrieb umzustellen, womit elektrische Energie aus dem Speicher entnommen werden muss.

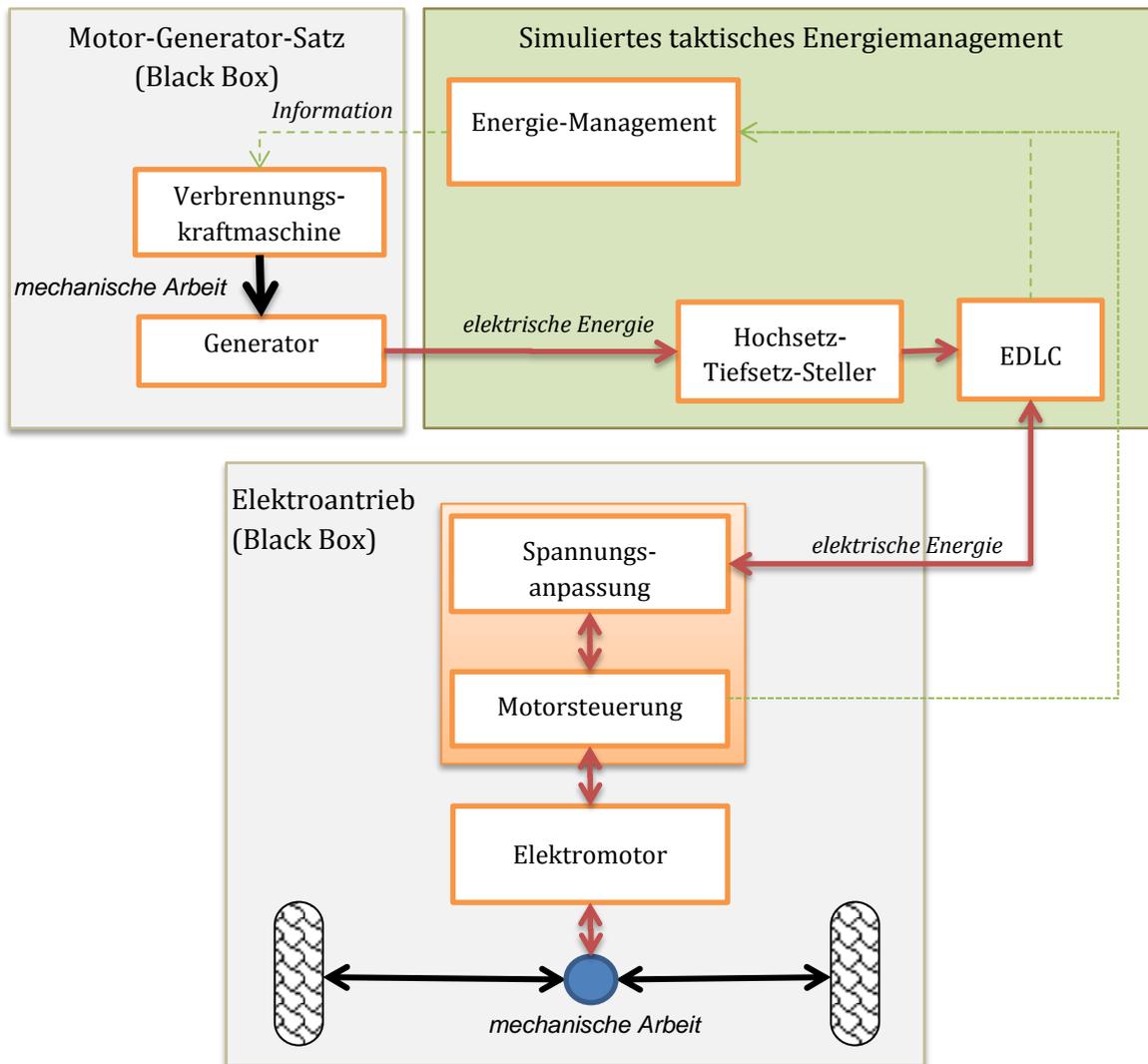


Abbildung 7: Blockdiagramm für die Simulation des Antriebssystems

5.3 DIMENSIONIERUNG DER KOMPONENTEN

5.3.1 AUSLEGUNG NENNLEISTUNG MOTOR-GENERATOR-SATZ (VKM)

Bei einem Hybridantrieb kann, bei ausreichender Speichergröße, ein Stromerzeuger (bestehend aus VKM und Generator) mit geringerer Nennleistung installiert werden, als bei einem konventionellen Antrieb für die VKM erforderlich wäre. Beim hier untersuchten seriell-hybriden Antrieb wird vom kleiner dimensionierten Generator, als Teil des Motor-Generator-Satzes, elektrische Energie im EDLC zwischengespeichert. Der Antrieb erfolgt über eine ausreichend dimensionierte Elektromaschine. Des Weiteren kann die mittlere Antriebsleistung aufgrund der nutzbaren rekuperierten Energie verringert werden, die nach Abzug der Verluste zwischengespeichert wird. In der Berechnung der mittleren erforderlichen mechanischen Leistung in Formel 5 wird den Einsparungen die Energie für elektrische Verluste und die elektrischen Verbraucher entgegengestellt:

Formel 5: Berechnung der mittleren Leistung der VKM des Motor-Generator-Satzes aus der Bilanz für eine Fahrkurve

$$P_{VKM\ GenSet} = \frac{\sum_i P_{Antr_i} \Delta t - \sum_i P_{Rek} \Delta t + \sum_i P_{el.Verl_i} \Delta t + \sum_i P_{el.Verbr_i} \Delta t}{\eta_{Gen} \eta_{BBC} \sum_i \Delta t}$$

- i* laufender Index über die bilanzierte Fahrstrecke
- $P_{VKM\ GenSet}$ mittlere erforderliche mechanische Leistung des Motor-Generator-Satzes
- P_{Antr} erforderliche mechanische Antriebsleistung
- P_{Rek} mechanische Bremsleistung bei Rekuperation
- Δt Zeitschritt
- η_{Gen} mittlerer Wirkungsgrad Generator
- η_{BBC} mittlerer Wirkungsgrad Hochsetz- Tiefsetz-Steller
- $P_{el. Verl.}$ elektrische Verluste während des gesamten Betriebes inkl. Rekuperation (Speicher, Widerstände...)
- $P_{el. Verbr.}$ elektrische Verbraucher (Beleuchtung, Lenkung, Bremsen, Türen, Telematik, Klimaanlage etc.)

Der Zusatzbedarf an Energie für Luftverdichter zur Versorgung von Hilfsaggregaten mit Druckluftbetrieb etc. wird bei konventionell angetriebenen Bussen mit 5 % (103) angegeben. Beim elektrischen Antrieb werden pneumatische durch elektrisch angetriebene hydraulische oder effizientere aber komplexere (104) vollelektrische Systeme ersetzt. Der Einfluss der Höhe des Zusatzenergiebedarfs auf die Ergebnisse wird in Kap. 11.3.3 untersucht.

Wenn eine Beheizung des Fahrgastraumes hinzukommt, wird der elektrische Zusatzbedarf im Extremfall im Winter beim elektrischen Bus mehr steigen (siehe auch Kap. 11.3.3). Auch bei Berücksichtigung der Abwärme der großen elektrischen Maschinen (105) steht weniger nutzbare Abwärme für die Heizung zur Verfügung. Durch den Einsatz einer ggf. vorhandenen Klimaanlage für Heizzwecke, um die Abwärme der VKM des Motor-Generator-Satzes zu ergänzen, kann auf eine mit Diesel betriebene Standheizung verzichtet und ein ineffizientes rein elektrisches Heizen vermieden werden. Die Leistungszahl der Kältemaschine im Betrieb als Wärmepumpe und damit die Effizienz wären bei gleich großen Temperaturhuben im Heizbetrieb höher als im Kühlbetrieb (106). Die geringeren auftretenden Temperaturdifferenzen dT im Sommer (maximal 40 °C außen zu 22 °C innen ergibt ein dT von 18 K) im Vergleich zum Winter (maximal 22 °C innen zu -25 °C außen ergibt ein dT von 47 K) und die geringere Vereisungsproblematik beim Verdampfer im Sommer kehren die Reihenfolge beim maximalen Energiebedarf zugunsten des Kühlbetriebes aber um. Im Vergleich zu über die VKM direkt angetriebene Klimaanlagen kann der elektrisch angetriebene Kompressor leichter geregelt werden (107). Dies spielt eine wichtige Rolle für einen geringeren Energiebedarf bei der Klimatisierung über eine Kältemaschine. Für die Simulation hätte eine Klimaanlage den Effekt, dass der Motor-Generator-Satz bei hohem Zusatzenergiebedarf länger im Einsatz sein wird, wenn dieser in der Nennleistung gleich dimensioniert bleibt. Dies ist möglich ist, wenn die Stromverbrauchsspitzen durch Abschalten (Klimaanlage) oder Versorgung aus dem Energiespeicher (Lenkung, Bremsen, Telematik, Türen) gekappt werden. Taktisch schlecht für die Dimensionierung des Energiespeichers ist dabei, nicht so sehr, dass die Betätigung der Türen bereits vor dem Losfahren aus der Haltestelle Energie benötigt, sondern dass gleichzeitig durch die vorhergehende Öffnung der Türen der Heiz- oder Klimatisierungsbedarf ansteigt.

Wenn eine kurzfristige Überlastung des elektrischen Antriebs zugelassen wird, kann dieser auch für eine kleinere Nennleistung als die originale VKM beim Standard-Antrieb mit VKM dimensioniert werden.

Der Generator des Motor-Generator-Satzes kann infolge der überwiegend digitalen Betriebsweise entsprechend der Norm (108) als Industriemaschine betrachtet werden. Die Spitzenlast-Auslegung des Generators beim Stadtbus muss nicht für die Dauerleistung der elektrischen Maschine S1, sondern könnte für den Lastfall S3 (105) erfolgen. Die Kühlgrenzen beim Betrieb der elektrischen Maschine werden einschränkender, wenn die elektrische Nennleistung durch größere Energiespeicher reduziert wird und der Generator länger in Betrieb ist.

Zu beachten sind die unterschiedlichen Verläufe der Leistung über die Drehzahl bei elektrischer Maschine und VKM, wodurch eine Optimierung der Abstimmung der Maschinen vorgenommen werden kann (siehe auch Kap. 7.2). Die weiteren Fundamentaldaten des simulierten Antriebssystems wurden in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Grunddaten Antriebssystem für die Simulation – Annahmen für die Leistungen, das Drehmoment und die Berechnung der leistungsabhängigen Masse der Maschinen vgl. auch (94), (49), (106)

Bezeichnung	Annahme Größenswert
Nennleistung VKM ohne Hybrid	200 kW _{mech}
Nennleistung VKM Hybrid	180 kW _{mech}
Masse-Leistung-Verhältnis VKM+Getriebe	5,77 kg / kW _{mech}
Nennleistung Generator	160 kW _{el}
Nennleistung elektrischer Antriebsmotor	170 kW _{el}
Masse-Leistungs-Verhältnis Elektromaschinen	2,25 kg / kW _{el}
Rotatorisches Trägheitsmoment VKM+Generator	0,01 N m / W

5.3.2 EDLC DIMENSIONIERUNG

Als Energiespeicher wurden elektrochemische Doppelschichtkondensatoren (EDLC) gewählt, die in Kap. 5.6 beschrieben werden. MAN gab für die erste Generation von EDLC-ausgerüsteten Bussen einen Energieinhalt der EDLC mit 0,4 kWh (49) an. Im nächsten Fahrzeugkonzept hatte MAN eine VKM mit 184 kW und 0,5 kWh EDLC Speicher (108) (109) verbaut, wobei dieser geringe Speicher durch einen kontinuierlichen Betrieb des Motor-Generator-Satzes kompensiert werden kann. Um den erforderlichen Speicherinhalt für diese Arbeit abschätzen zu können, sollen die in Graz selbst gemessenen Fahrkurven statistisch ausgewertet werden. Die Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeiten in dem über GPS-Aufzeichnungen (siehe Kap. 8.2) gemessenen Teilabschnitt der Linie 67 in Richtung Augasse zeigt Abbildung 8:

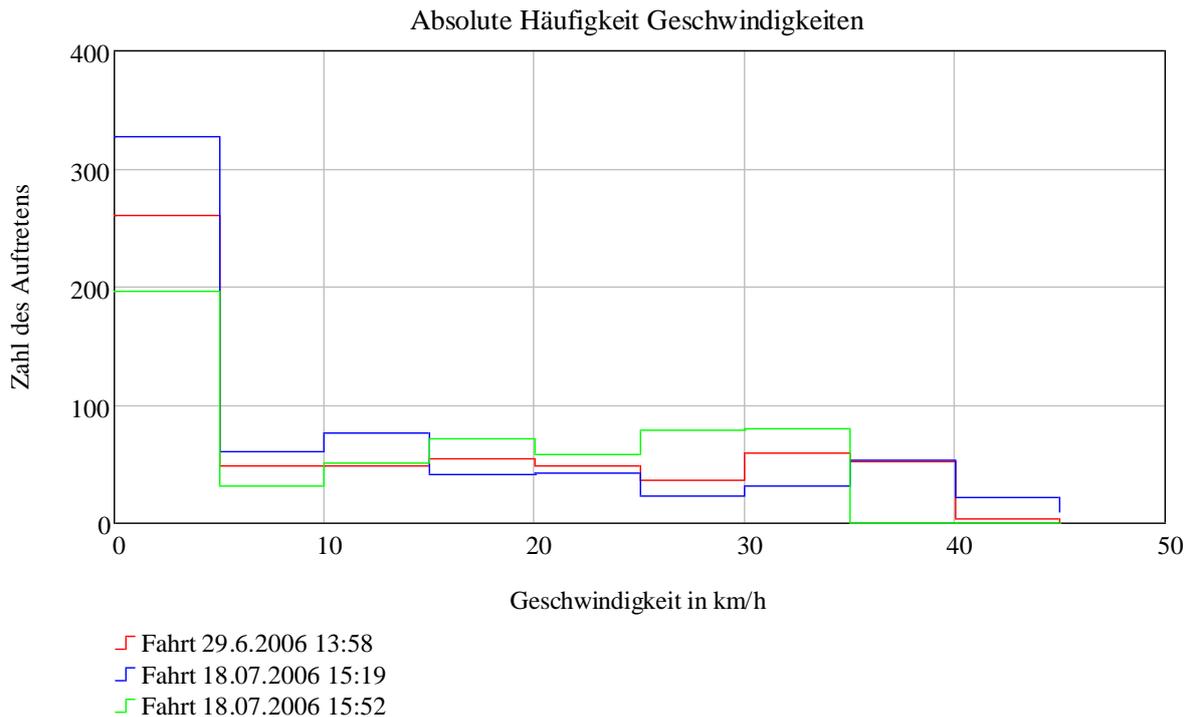


Abbildung 8: Absolute Häufigkeit (mit der Summe der Zeit des Auftretens) der Geschwindigkeit bei den mittels GPS aufgezeichneten (gültigen) drei Fahrten vom 29.6, 30.6 und 19.7.2006

Die Häufigkeit der Geschwindigkeiten über 40 km/h ist gering. Mit den Formeln in Kap. 4.2 wurde der Energiebedarf zum Beschleunigen und die entstehende Energie beim Anhalten mittels Differenzenmethode und für konstante Beschleunigungen berechnet und in Tabelle 3 dargestellt:

Tabelle 3: mechanischer Energiebedarf bzw. Energieanfall bei konstanten Beschleunigungs- und Bremsvorgängen mit Berücksichtigung der geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstände

Geschwindigkeiten	Beschleunigung	Mechanische Energie
0 km / h auf 48 km / h	0,6 m / s ²	0,49 kWh
48 km / h auf 0 km / h	-1,5 m / s ²	-0,39 kWh
0 km / h auf 36 km / h	0,6 m / s ²	0,26 kWh
36 km / h auf 0 km / h	-1,5 m / s ²	-0,22 kWh
Annahmen Masse	16,7 t träge Masse	schwere Masse 15,2 t

Beim Verzögern sind die rekuperierbaren Energien geringer, weil die kinetische Energie teilweise in Rollreibung und Luftwiderstand dissipiert wird. Die errechnete mechanische Energie berücksichtigt noch nicht die Verluste bei der Energieumwandlung in den elektrischen Maschinen und in der Leistungselektronik, da hier ausschließlich die Längsdynamik des Fahrzeuges betrachtet wird.

Es wurde in der Simulation, wie in Tabelle 4 festgehalten, im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung der EDLC (110) und auch in der Hoffnung auf eine Kostendegression und Erhöhung der Energiedichte, ein größerer Speicher verwendet, um einen Betrieb des Motor-Generator-Satzes mit Hystereseregulung (siehe Kap. 7.4) und längeren Unterbrechungen des Betriebs der VKM zu ermöglichen:

Tabelle 4: Grunddaten EDLC in der Simulation; Annahmen, tw. siehe (49)

Bezeichnung	Größenwert
Speicherinhalt des EDLC	3 MJ oder 0,83 kWh
Kapazität des EDLC	15,1 F
Masse-zu-Speicherenergie Verhältnis des EDLC (Energiedichte) Praxiswerte inkl. Kühlung und Befestigung 2006	500 kg / kWh (2 Wh / kg)
Nennspannung EDLC	630 V
Nennspannung Motor-Generator	400 V

Das hohe Masse-zu-Speicherenergie-Verhältnis der EDLC ergibt sich durch die erforderlichen Kühl- und Befestigungseinrichtungen; die gerne veröffentlichten, vorteilhafteren Werte für die Energiedichte beziehen sich nur auf die Zellen selbst.

Bei Elektroantrieben sind maximale Wirkungsgrade bis über 90 % möglich, wodurch im Vergleich zur VKM hier bei den Antriebskomponenten sehr viel weniger Wärme anfällt (siehe Kap. 6.3.4). Bei einer Nutzung dieser Abwärme für die Beheizung könnten theoretisch andere Komponenten im Heizsystem kleiner und leichter bauen, wenn eine Wasserkühlung genutzt werden kann. Kühlluft könnte bei Schäden an der Elektronik oder im EDLC z. B. durch die Zersetzung der organischen Elektrolyte auch toxische Gase enthalten (115), wodurch sich eine direkte Nutzung von Abluft verbietet. Obwohl die Summe der Verluste bei den verschiedenen elektrischen Komponenten des seriell-hybriden Antriebes in derselben Größenordnung liegt, wie der Wärmeanfall bei der VKM (siehe Abbildung 22), machen die Vielzahl an notwendigen Aggregaten bei denen Wärme abgeführt werden müsste (Generator, BBC, Motor, EDLC...) eine produktive Nutzung der Abwärme aber schwierig.

5.4 SENSIBILITÄTSANALYSE ANTRIEBSLEISTUNG

Um die Auswirkungen fehlerhafter Annahmen für die Fahrzeuglängsdynamik abschätzen zu können, wurde eine Sensibilitätsanalyse für die Fahrwiderstände durchgeführt. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse für eine Simulation mit Fahrzyklen aus eigenen GPS-Messwerten (Datengewinnung siehe Kap. 8.2) für einen Abschnitt der Linie 67 in Graz. Dabei wurde der Luftwiderstand und die Rollreibung nach unten und oben um 50 % verändert, sowie die Gesamtmasse von 12 t bis 18 t variiert, wobei für die Berechnung des Energiebedarfs für den Antrieb nur positive Fahrwiderstände berücksichtigt wurden.

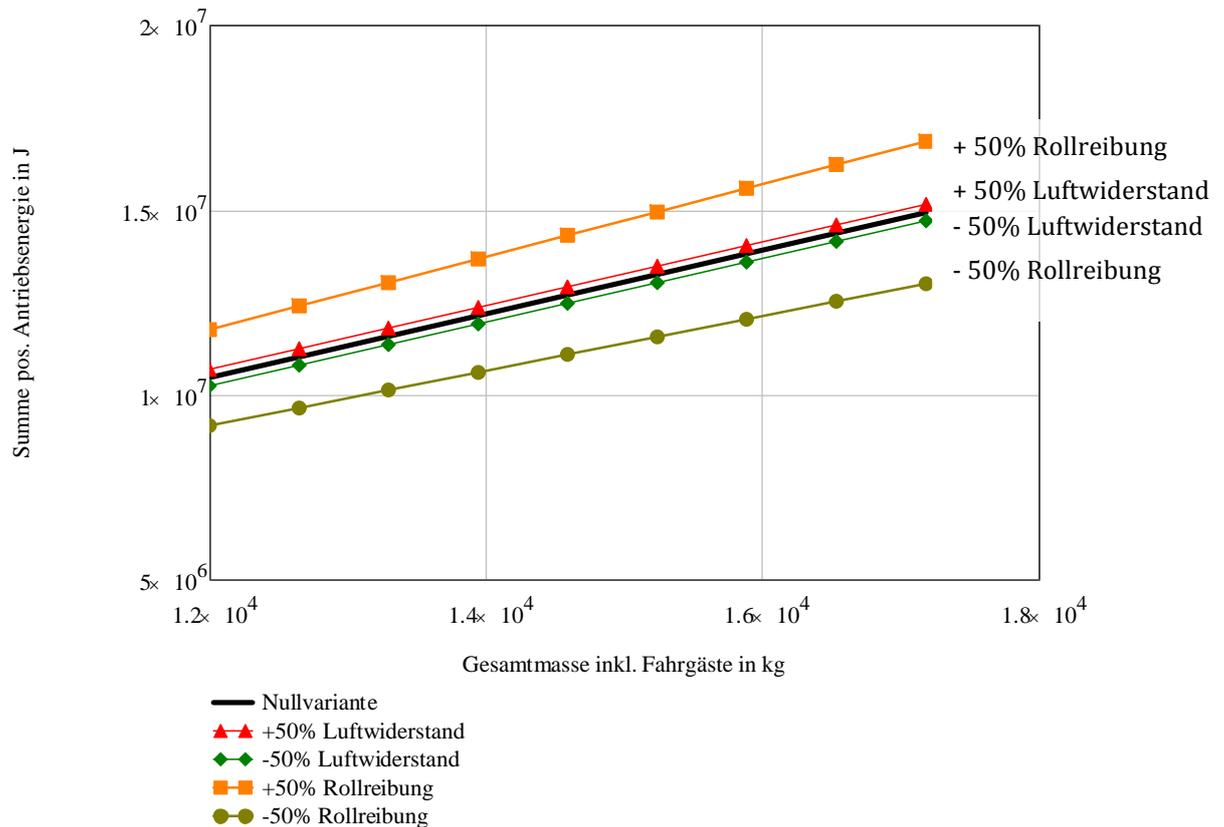


Abbildung 9: Sensibilitätsanalyse Energiebedarf für den Fahrwiderstand für den aufgezeichneten Linienabschnitt Fahrt 0 vom 29.6. 2006 Linie 67

Die Präzision der Angaben zum Luftwiderstand kann aufgrund der geringen Geschwindigkeiten geringer sein, der Rollwiderstand wird im Vergleich dazu genauer (abhängig von der Geschwindigkeit) berechnet. Ebenso groß ist der Einfluss der Belegung des Fahrzeuges mit Fahrgästen (durch einen variablen Besetzungsgrad), die von beinahe Null bis im Extremfall 6 Tonnen reichen kann. Infolge der zusätzlichen Masse durch die elektrische Ausrüstung (siehe Tabelle 4) beim hybrid-elektrischen Antrieb ist bei den simulierten Fahrtabschnitten der Linie 67 in Graz mit einem Mehrbedarf von mechanischer Antriebsenergie von ca. 10 % zu rechnen (Mittelwert aller 9 benutzten Fahrtabschnitte).

5.5 CHARAKTERISIERUNG SERIELL-HYBRIDER ANTRIEBSSYSTEME

Seriell-hybride Systeme sind dort vorteilhaft einsetzbar, wo der Energieumsatz durch Bremsen und Beschleunigen dominiert. Im Folgenden werden die Vorteile und die Dimensionierung des seriell-hybriden Antriebssystems besprochen.

5.5.1 VORTEILE DURCH SERIELL-HYBRIDE ANTRIEBSSYSTEME

Verringerung der Emissionen

Durch die **Reduktion der Dynamik** im Lastverlaufes der Verbrennungskraftmaschine VKM bei hybriden Antriebskonzepten (Phlegmatisierung) und der Möglichkeit die VKM in der Nennleistung verkleinern zu können, entstehen sowohl neue Anforderungen, aber auch geringere Emissionen (111) und auch neue Möglichkeiten für die Abgasnachbehandlung. Einerseits werden motor-interne Verfahren möglich, die auf Kosten der Agilität (Reaktionszeit auf eine Leistungsanforderung) die Emissionen im Rohgas verringern. Bei niedrigen Drehzahlen ist eine deutliche Verbesserung der Partikel-Emissionen durch eine bessere Gemischbildung und einen länger dauernde Verbrennung (besserer Abbrand) zu erwarten. Geringe Amplituden beim

Leistungsverlauf der VKM bringen beim Hybridantrieb positive Auswirkungen auf Verbrauch und die Partikel, CO und NO_x-Emissionen (101). Für seriell-hybride Busse wurden Reduktionen z. B. bei NO_x im Vergleich zum Standardbus von 30 % bis 40 % gemessen (112). Bei den Kohlenwasserstoffemissionen wirken die Leistungsamplituden nicht emissionsverringend, aber es können durch Wegfall der Schubphasen der VKM bei Benutzung der Motorbremse Emissionsreduktionen erzielt werden.

Daneben ist es aber auch nötig die **Auswirkungen auf die nachgeschaltete Abgasreinigung** zu betrachten. Eine aktive Regeneration des Dieselpartikelfilters (DPF) erzeugt NO₂, und eine passive Regeneration erzeugt CO₂ (113). Ein Abschalten der VKM beim seriellen Hybridantrieb beim Takten kühlt den DPF weniger schnell aus, als eine Durchströmung mit kaltem Abgas beim ununterbrochenen Teillastbetrieb (114), da der DPF isoliert ist. Auch kann über ein temporäres Abtrennen des DPF mittels sperrender Rohgasklappe vor und Reingasklappe nach dem DPF der Auskühlprozess verringert werden. Damit können beim seriellen Hybridantrieb durch den intermittierenden Vollastbetrieb höhere Oberflächentemperaturen im DPF erzielt werden, die einen ausreichenden Abbrand von Ruß im DPF ermöglichen. Damit werden Überlegungen zur elektrischen Beheizung (115) bzw. zum elektrisch betriebenen Reinigen des DPF obsolet.

Aufrüstbarkeit von Batterie-elektrischen Bussen bzw. Oberleitungs-Bussen

Durch die im Vergleich zu parallel-hybriden Antrieben wegfallende mechanische Schnittstelle zur Antriebswelle bei seriell-hybriden Antrieben sind Stromerzeuger leichter standardisierbar. Mittels Einbindung in das meist vorhandene CAN-Bus-System für den Antrieb (116), oder über den für viele Knoten kostengünstigeren LIN-Bus (117), kann der Stromerzeuger auch ohne erweiterte Eigenintelligenz, und nur fokussierend auf den Selbstschutz, produziert werden. Beide Eigenschaften würden es Drittanbietern aus Tier 1 (Zulieferer zu OEMs) ermöglichen mit hohen Stückzahlen und kostengünstigen Motor-Generator-Satz-Modulen auf den Markt zu kommen. Dabei müsste es auch nicht bei Selbstzündungs-Motoren beim so genannten *Fuel Converter* bleiben (118). In Brescia, und anderen italienischen Städten (119), laufen Busse mit Gasturbinenantrieb des Herstellers OMB, der sich im Besitz des örtlichen Verkehrsbetriebs *Gruppo Brescia Mobilità* (120) (121) befindet. Die hohen Kosten der Gasturbine und der im Vergleich zum Diesel-Prozess (Gleichdruckprozess) systembedingt (und durch eine eventuelle höhere Untersetzung der Drehzahl zum Generator) geringere Vollastwirkungsgrad der Gasturbine durch den Joule-Prozess haben jedoch bisher ihre weitere Verbreitung verhindert. Durch die hohe volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte bleiben aber Gasturbinen weiter Teil der Entwicklung, wie z. B. als Reichweitenverlängerer für ein elektrisches Nutzfahrzeug (124).

5.5.2 GRUNDSÄTZLICHE DIMENSIONIERUNG DES SERIELL-HYBRIDEN ANTRIEBSSYSTEMS

Die **Auslegung der Leistung der Antriebsmaschine** erfolgt für den Stadtbuss mit Betrieb bei niedrigen Geschwindigkeiten für einen Auslegungspunkt, wo Geschwindigkeit und Beschleunigung eine maximale Antriebsleistung hervorrufen. In Formel 6 werden die in Kap. 4.2 beschriebenen Ansätze für die Längsdynamik in einer einzigen Formel für die Berechnung der aktuellen Antriebsleistung im *i*-ten Element der benutzen Fahrkurve zusammengefasst.

Formel 6: Berechnung maximale Antriebsleistung mit Beschleunigungskomponente

$$P_{Antr_i} = \max(K_1 v_i + K_2 v_i^2 + K_3 v_i^3 + v_i a_i m_{ges})$$

Die folgenden Konstanten gelten für eine konstante Nutzlast und einen zweiachsigen 12 m langen Stadtbus:

K_1	Konstante für linearen Geschwindigkeitseinfluss (858,051 N)
K_2	Konstante für quadratischen Geschwindigkeitseinfluss (22,146 kg / s)
K_3	Konstante für kubischen Geschwindigkeitseinfluss (3,059 kg / m)
v_i	Geschwindigkeit (i-ter Wert der Fahrkurve) in m / s
a_i	Beschleunigung (i-ter Wert der Fahrkurve) in m / s ²
m_{ges}	Gesamtmasse Fahrzeug in kg (inkl. träge Masse)

Durch das hohe Gesamtgewicht des Fahrzeuges führen mittlere Beschleunigungen bei mittleren Geschwindigkeiten zu einem dominanten Anteil der Beschleunigungsleistung an der Antriebsleistung, und damit zu idealen Voraussetzungen für eine Rekuperation der Verzögerungsenergie. Beim idealen Hybridantrieb mit verlustfreier Rekuperation, könnte für die Bemessung von VKM und Generator die Antriebsenergie über die Fahrt gemittelt werden, außerdem kann ein Teil der rekuperierten Bremsenergie in Formel 6 im Zähler bei der Mittelwertbestimmung abgezogen werden. Formel 7 zeigt den prinzipiellen Ansatz bei der Bestimmung einer konstant erforderlichen Antriebsleistung, wenn die Speichergröße nicht das begrenzende Element darstellt:

Formel 7: Berechnung mittlere Antriebsleistung mit Rekuperation und idealem Speicher

$$P_{Antr\ mittl} = \frac{\sum_i P_{Antr_i} \Delta t - \sum_i P_{Rek} \Delta t}{\sum_i \Delta t}$$

P_{Antr_i}	Antriebsleistung zum Zeitpunkt i
P_{Rek}	Rekuperierte verfügbare Antriebsenergie
Δt	Zeitinkrement

Ein weiteres wichtiges Entscheidungskriterium bei der Dimensionierung des Stromerzeugers ist damit die **Höhe der rekuperierbaren Bremsenergie**. Parallel-hybride Antriebskonzepte haben durch die direkte mechanische Kopplung der VKM mit dem Rad im Antriebsfall (also ohne Beachtung der Rekuperationsmöglichkeiten) mit 42 % anstatt 37 % (45) einen besseren Wirkungsgrad. Bei einem kostengünstigen parallel-hybriden Konzept mit stärkerer Beschränkungen in der Leistungsaufnahme der elektrischen Maschine oder bei Beschränkung der Leistungsaufnahme der Energiespeicher, ergeben sich jedoch beim Rekuperieren geringere Energieumsätze und damit nicht dieselben Einsparungen im transienten Stadtverkehr, wie beim seriell-hybriden Antrieb mit entsprechender Auslegung aller Komponenten auf die in der Praxis auftretenden Maximalleistungen bzw. -ströme. Formel 8 stellt diesen Zusammenhang zwischen rekuperierbarer Energie und maximaler elektrisch Leistung der die Verzögerungsenergie rekuperierenden elektrischen Maschine mathematisch dar:

Formel 8: Berechnung nutzbare rekuperierte Bremsenergie

$$W_{Rek} = \sum_i \min(-P_{Antr_i}, P_{Gen}) \Delta t$$

P_{Antr_i}	Antriebsleistung zum Zeitpunkt i
P_{Gen}	maximal zulässige mechanische Leistung Generator elektrische Bremsung
W_{Rek}	rekuperierbare mechanische Energie

Bei der Rekuperation ist die Leistung durch die negative Beschleunigung dann größer Null, wenn Rollreibung und Luftwiderstand überwunden werden. Es kann auch teilweise noch die Energie aus rotierenden Antriebsteilen ausgenutzt werden. Für den Antrieb wird diese Drehmasse vereinfacht über einen Drehmassenzusatzfaktor zur schweren Masse hinzuaddiert. Für den nicht mechanisch mit dem Antrieb verbundenen Motor-Generator-Satz, muss jedoch die kinetische Energie über Formel 9 berechnet werden:

Formel 9: Berechnung der zum Start des Motor-Generatorsatzes erforderlichen Energie

$$W_{start} = \frac{I_{rot} \frac{\omega^2}{2}}{\eta_{an}} - I_{rot} \left(\frac{\omega^2}{2} - \frac{\omega_{min}^2}{2} \right) \eta_{aus}$$

- I_{rot} Trägheitsmoment bezüglich der Drehachse in kg / m²
- ω Winkelgeschwindigkeit bei Betriebsdrehzahl in rad / sec
- ω_{min} minimal für eine Rekuperation erforderliche Winkelgeschwindigkeit beim Auslaufen des Motor-Generator-Satzes (infolge der Grenzen des Hochsetz-Stellers)
- η_{an} elektrischer Wirkungsgrad Starter
- η_{aus} elektrischer Wirkungsgrad Generator beim Auslauf

Formel 9 kann für konstante Drehzahlen vorberechnet werden. In der Simulation wurde vereinfachend ein konstanter Aufwand für das Wiederdanstarten des Motor-Generator-Satzes angesetzt, da hauptsächlich der optimale Betriebspunkt genutzt wird.

In der Abbildung 10 wird der Energiebedarf für den Antrieb, nach Auswertung der für die Simulation benutzen Daten, dargestellt. Durch die große Masse des Fahrzeuges und den überaus transienten Geschwindigkeitsverlauf durch viele Lichtsignalanlagen, Fußgängerübergänge und Haltestellen, ergibt sich ein sehr hoher Anteil für die erforderliche Beschleunigungsenergie. In der Berechnung für die Grafik wurden die positiven Werte der Energie summiert, und nicht der Saldo, also die Differenz zwischen Beschleunigungs- und Verzögerungsenergie. Die Simulation und die folgende Grafik benutzt die selbst in Graz aufgezeichneten drei Fahrkurven (siehe Kap. 8.2) und die daraus synthetisierten weiteren sechs Fahrkurven.

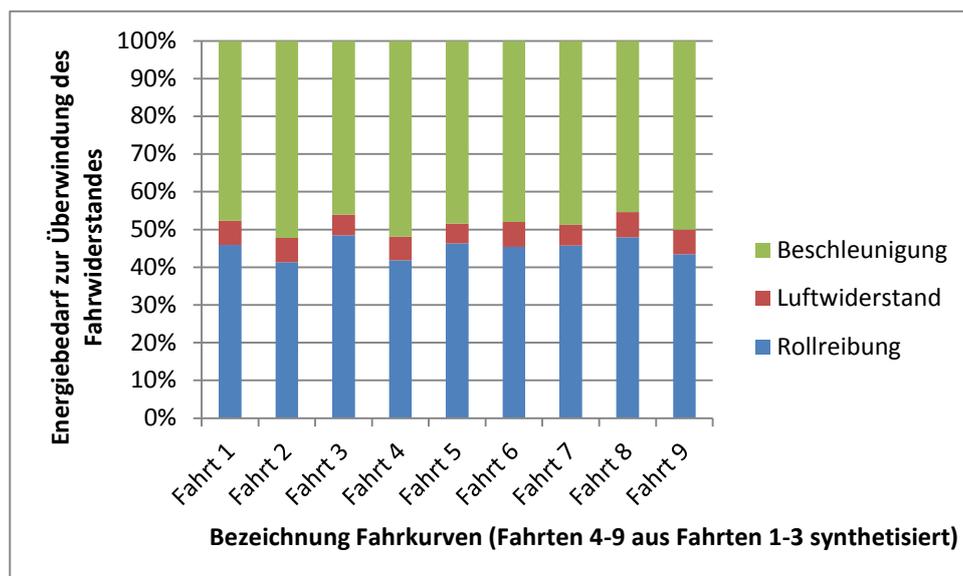


Abbildung 10: Anteile Fahrwiderstände am Energiebedarf: statistische Auswertung aller in der Simulation benutzen Fahrkurven³

³ Die Fahrten 4 bis 9 wurden synthetisch durch Kombination der gemessenen Fahrten 1 bis 3 erzeugt.

Bei einem seriell-hybriden Antrieb kann zwar ein großer Teil der Verzögerungsenergie rekupe-riert werden, Luftwiderstand und Rollreibung verringern in allen Fällen die zur Umwandlung in elektrische Energie verfügbare Verzögerungsenergie. Für den Antrieb treten bei der Umwandlung der chemischen in mechanische, dann in elektrische und wieder in mechanische Energie treten Verluste auf, bei der Rekuperation bei der Umwandlung der mechanischen in elektrische Energie (siehe Kap. 6.3)

5.6 SPEICHERSYSTEME FÜR HYBRIDANTRIEBE

Im folgenden Kapitel wird der Einsatz des Energiespeichers für die Simulation analysiert. Nach einer Definition der Anforderungen an den Energiespeicher, wird die technische Entwicklung im Hinblick auf die Konzepte und Leistungsdaten von Energiespeichern kurz besprochen.

Unterschiedliche Sekundärbatterien werden hier, weil sie bereits oft in Publikationen wie z. B. (122) behandelt wurden, nicht näher analysiert. Andere Speichersysteme wie Schwungräder haben zwar ausreichende Leistungsparameter (123), sind aber bisher nur im Bereich des Rennsportes im Einsatz (124), wo Kosten eine geringere Rolle spielen. Druckluftsysteme haben wegen der nicht isentropen Verdichtung und Entspannung, trotz mehrstufiger Verfahren und Rückkühlung, nur thermodynamische Wirkungsgrade bis zu 65 % (125). Hydraulische Systeme konnten sich bisher, auch wegen den Schallemissionen (126), nicht durchsetzen, sie benötigen einen mechanischen, oder wie nun von Peugeot benutzten pneumatischen Speicher (30).

Elektrochemische Speichersysteme fügen sich besser in ein elektrisches Energiemanagement ein. Hier werden die in der Simulation verwendeten **Elektrochemischen Doppelschichtkondensatoren** EDLC im Detail vorgestellt, aber auch die möglicherweise konvergierenden Entwicklungen bei EDLC und bei elektrochemischen Sekundärzellen besprochen.

5.6.1 ANFORDERUNGEN AN ENERGIESPEICHER

Energiespeichersysteme für den Einsatz im städtischen hoch transienten Verkehr müssen in der Lage sein, auch bei häufigem Auftreten, der maximalen elektrischen Bremsleistung ohne Schädigung standzuhalten und die rekuperierte umgewandelte Bremsenergie möglichst verlustfrei aufzunehmen. Für den Öffentlichen Nahverkehr (und in ähnlicher Form auch für die Entsorgung d. h. Abfallsammlung) ergeben sich demnach folgende Anforderungen:

Tabelle 5: generelle und spezielle Anforderungen an Energiespeicher in ÖPNV

1) Hohe gravimetrische Leistungsdichte, da zusätzliche Masse mehr Fahrwiderstand bedeutet und die erlaubte Zuladung (Zahl der Passagiere) verringert.
2) Mittlere volumetrische Leistungsdichte, da die Speicher auf dem Fahrzeugdach genug Raum haben.
3) Hoher Wirkungsgrad bei Ladung – Speichern – Entladung.
4) Hohe gravimetrische Energiedichte, da zusätzliche Masse mehr Fahrwiderstand bedeutet und die erlaubte Zuladung (Zahl der Passagiere) verringert.
5) Mittlere volumetrische Energiedichte, da die Speicher auf dem Fahrzeugdach genug Raum haben.
6) Niedrige Selbstentladung; da die Energiespeicher nach dem Betrieb entladen werden und im Stillstand keine Verluste haben, ist hier ein Kompromiss im Hinblick auf die Selbstentladung möglich.
7) Betriebsbereich von 60 °C bis -35 °C, da auch ein Abstellen der Fahrzeuge im Freien möglich sein muss.
8) Lange Gebrauchsdauer (hohe Zyklenfestigkeit und mechanische Robustheit) 8 bis 12 Jahre, bzw. je nach Preis und einfacher Austauschbarkeit auch weniger.
9) Keine Überhitzung, Feuer, Explosion bei Unfällen oder Versagen der Steuerung.
10) Abdichtung bei Eindringen von Schmutz und Nässe in das Luft-Kühlsystem.

Bei Sekundärbatterien ist bei einer hohen Zahl von vollen Zyklen (vollständiges Laden und Entladen) eine starke Degradation der Zellen zu erwarten. Die Kosten pro Energieumsatz der EDLC sind aufgrund der höheren erzielbaren Zyklenzahlen trotz der eine Zehnerpotenz höheren Investitionskosten für EDLC um den Faktor 50 bis maximal 200 (127) niedriger, als bei Lithium-Ionen Sekundärzellen. Darüber hinaus existiert aber bei EDLC und Lithium-Ionen Sekundärzellen auch eine, so genannte kalendarische, d. h. nicht durch die Betriebsart bedingte, technische Lebensdauer. Die Schädigung wird dabei durch extreme Temperaturen gefördert. Bei parallel-hybriden Antrieben, mit sehr kleinen elektrischen Maschinen, sind bei einer Degradation oder einem Versagen des Energiespeichers, weniger negative Auswirkungen auf die Akzeptanz durch die Nutzer zu erwarten. Bei seriell-hybriden Antrieben kann beim Ausfall der Energiespeicher aufgrund der geringeren Nennleistung des Stromerzeugers nur ein dieselelektrischer Betrieb mit geringerer Antriebsleistung gefahren werden, obwohl die elektrische Antriebsmaschine eine höhere Leistung bereitstellen könnte. Damit hat beim seriell-hybridelektrischen Antrieb die Qualität des Energiespeichers eine größere Wichtigkeit.

5.6.2 TECHNISCHE ENTWICKLUNG DER SPEICHERSYSTEME

Im Bereich der Lithium-Polymer-Sekundärzellen gibt es umfangreiche Forschung, eine davon entwickelt CGMN (*crystalline-glass mesoporous nanocomposite*) oder Meso-poröse LiFePO₄/C-Nanokomposit Kathoden Materialien, die nicht nur die gewünschte Leistungsdichte, sondern auch eine höhere Energiedichte erzielen. 2012 waren diese neuen HED-LFP Kathodenmaterialien im Pilotmaßstab verfügbar (128), aber es zeichnet sich beim Vergleich der publizierten Energie (Kapazität) bezogen auf die Kathodenmasse (129) keine Steigerung im Vergleich zu älteren Literatur ab (130). Auch die Hochschule für Technik und Architektur Luzern entwickelt im Projekt *SAM-Tohyco* seit Juni 1997 einen universeller Energiespeicher, der die

Vorzüge einer Sekundärbatterie (Energiedichte) und von Elektrischen Doppelschicht Kondensatoren EDLC (Leistungsdichte) (131) (132) vereinen soll.

Die Lebensdauer von Sekundärbatterien kann im transienten Betrieb auch durch zusätzliche EDLC verlängert werden, da damit die maximalen Stromstärken für die Sekundärbatterie gesenkt werden. Auch ist es dadurch möglich die Entladungstiefe etwas zu reduzieren. Es ist aber auch möglich die Sekundärzellen gleich für eine zyklische Hochstrombelastung auszulegen. Die technologische Entwicklung von Li-Ion (oder Li-Ion-Polymer) Sekundärbatterien hat im Bereich Leistungsdichte Fortschritte gemacht, sodass die Vorteile der Sekundärbatterien bei der Speicherdichte⁴ auch im Hochstrombereich ausgenutzt werden könnten. Spezielle für hohe Leistungen ausgelegte Nanophosphat-Lithium Ionen Zellen (133), erreichen 2013 bei kurzzeitiger Belastung (10 Sekunden) bereits eine gravimetrische Leistungsdichte von ca. 2700 W / kg, bei allerdings einer gravimetrischen Energiedichte von nur mehr 71 Wh / kg. Für eine Auswahl der Speichertechnologie müssen die Lade-Entlade-Wirkungsgrade und die Abhängigkeit des entnehmbaren Energieinhaltes von der Lagerdauer und der Entladegeschwindigkeit betrachtet werden. Im Unterschied zu Nickel-basierten Systemen sind bei Lithium-basierten Systemen geringere Selbstentladungen zu erwarten. Hochtemperaturzellen wie NaS müssen erst auf Betriebstemperatur gebracht werden, womit bei häufigem Abstellen Energie signifikant verloren geht.

Bei bereits lang am Markt eingeführten parallel-hybriden PKW-Antrieben war, aufgrund des Kostenvorteiles von NiMH-Systemen, nur ein langsamer Übergang bei den Energiespeichern von NiMH auf Lithium-Technologie zu bemerken (134) (135). Bei parallel-hybriden Antrieben ist im Unterschied zu batterie-elektrischen Antrieben die für Nickel-basierte Systeme typische Selbstentladung weniger kritisch, da lange Stillstände im (voll) geladenen Zustand für die Anwendung nicht erforderlich sind, sondern die die Energiespeicher schnell zyklen. Bei seriell-hybriden Antrieben für Linienbusse nutzen die Hersteller *Mercedes (Evobus)* (136) und *Irisbus* (137) Lithium-Ionen-Akkus, wobei unterschiedliche Kathodenmaterialien (LiFePO₄ oder LiMn etc.) zum Einsatz kommen. EDLC werden bei den seriell-hybriden Bussen von *MAN / Siemens* (138) und *Vossloh-Kiepe* (139) eingesetzt.

5.6.3 EIGENSCHAFTEN DER ELEKTRISCHEN DOPPELSCHICHT-KONDENSATOREN EDLC

Elektrische Doppelschicht-Kondensatoren sind zwischen Anode und Kathode (positiv und negativ polarisierter Elektrode) symmetrisch aufgebaut. Die aus aktiviertem Kohlenstoff bestehenden Elektroden und der poröse Separator sind mit einem flüssigen oder viskosen Elektrolyten getränkt. Letzterer ist daher für im Elektrolyten solvatisierte Ionen durchlässig. Es sind aber auch feste Elektrolyte in Entwicklung (141). Die Funktionsweise war lange Jahre unbekannt, das komplexeste Erklärungsmodell nach *Bockris-Devanathan-Muller* kann, neben der elektrostatischen Speicherung in der Doppelschicht von Kationen und Anionen an der Grenzfläche zwischen Elektrode und Elektrolyt, auch die im geringen Maße zusätzlich in der inneren Helmholtz Schicht auftretende Pseudokapazität erklären (141). Die nicht dargestellte Seite rechts des Separators spiegelt die Vorgänge mit umgekehrter Ladung.

⁴ Hohe Leistungsdichte > 400 W / kg und hoher Wirkungsgrad (Absenz eines Peukert Effektes) (240)

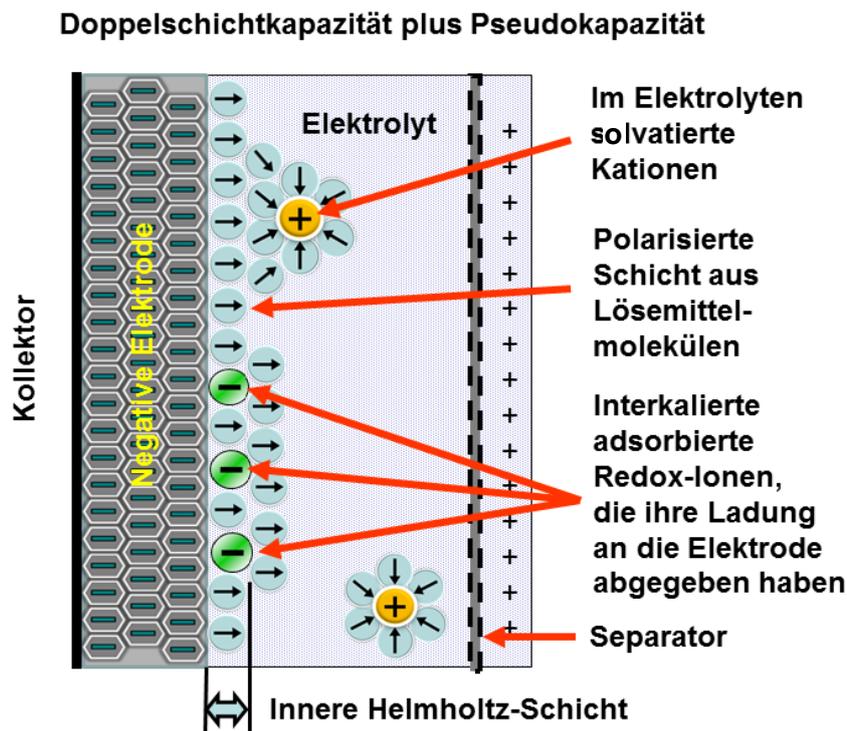


Abbildung 11 Darstellung der Effekte in Doppelschicht Kondensatoren (142)

EDLC zeichnen sich durch geringe Innenwiderstände und daher eine hohe mögliche Leistungsabgabe aus. Dabei ist bei kompakter Anordnung die Abfuhr der Wärme wichtig, was eine Anordnung am Dach des Fahrzeuges favorisiert. Je nach Einsatz werden bis zu mehrere hundert EDLC in Modulen in Serie geschaltet (140). Es ist ein Spannungsausgleich zwischen den einzelnen Zellen üblich, um keine Zelle zu überladen und damit zu schädigen. Bei Spannungsabweichungen einzelner herkömmlicher Zellen nach unten tritt zwar keine Schädigung auf, aber der Energieinhalt des Verbundes aus Zellen sinkt. Die Leistung pro Masseneinheit beträgt bei EDLC-Zellen mit Elektroden aus aktiviertem Kohlenstoff 4,3 kW / kg, die Energiedichte 3,9 bis 4,3 Wh / kg. EDLC sind über einen weiten Temperaturbereich von -35 °C (-40 °C) bis 65 °C einsetzbar und erreichen bei Vermeidung hoher Temperaturen bis zu 500.000 Zyklen und eine kalendarische (technische) Lebensdauer von zehn Jahren (141). Die in den EDLC gespeicherte Energie bemisst sich nach Formel 10:

Formel 10: Berechnung des Energieinhalts eines EDLC

$$W = \frac{1}{2} C_F \cdot V^2$$

- W Energieinhalt EDLC in Watt
- C_F Kapazität EDLC Zelle in Farad
- V EDLC-Zellspannung in Volt

Da die Zellspannung an die Systemspannung angepasst werden muss, sind Hochsetz-Tiefsetz-Steller erforderlich. In der Praxis kann durch die quadratische Abhängigkeit des Energieinhaltes von der Spannung die Entladung auf 50 % der Spannung beschränkt werden, wodurch die Aufgabe für den Hochsetz-Tiefsetz-Steller vereinfacht.

Zur Steigerung der spezifischen Energie wurden auch EDLC mit Zellspannungen von 2,7 V statt 2,5 V entwickelt. Mit einer Lithium dotierten Elektrode (143) sind bei **Lithium Ionen Kondensatoren** LIC auch Spannungen bis 3,8 V möglich, mit dem Nachteil, dass, wie bei Lithium basierten Sekundärzellen, eine untere Grenze für die Spannung von 2,2 V nicht unterschritten

werden darf, um eine Schädigung der Zelle zu vermeiden (144). Die Leistungsgewichte der LIC sollen 14 Wh / kg bis 15 Wh / kg (143) betragen, der gemessene Abfall der Kapazität der LIC nach 100 Zyklen war 2010 aber noch zu hoch (145).

Die Kosten, der höhere Aufwand bei der Leistungselektronik zur Spannungsanpassung und die rasche Entwicklung der Sekundärbatterien, besonders in Bezug auf die Leistungsdichte (mit Entladeströmen in Ampere in der Höhe von 3 C bis 5 C oder sogar 6 C (146) siehe Formel 11), schmälern den Vorteil der EDLC gegenüber neuen Sekundärzellen.

Formel 11 maximaler Entladestrom Sekundärbatterie

$$I_{max} = K_I C_{Bat}$$

I_{max} maximal zulässiger Entladestrom

K_I Konstante

C_{Bat} Kapazität der Sekundärbatterie in Ah

Zur Senkung der Herstellkosten für die Elektroden, welche durch die Notwendigkeit mit Nano Technologie vergrößerte Oberflächen zu schaffen hoch sind, werden alternative Herstellungsverfahren beforscht (142). In der Grundlagenforschung wird auch versucht mit Lithium-Titanat statt aktiviertem Kohlenstoff als Anode die Leistungs-, aber auch die Energiedichte der EDLC-Anoden ca. um den Faktor vier zu erhöhen (147). Vorteile dieses Materials sind eine geringere Neigung zur Bildung von Dendriten und eine bessere Eignung für niedrige Temperaturen. Wenn die Vorhersagen richtig sind, können bestehende Fertigungslinien weiter genutzt werden und Entladeströme bis 300 C (siehe Formel 11) zugelassen werden, ohne dass die Energiedichte dabei sinkt (148). Die kleineren Volumina der Sekundärzellen und der LIC erlauben es diese Energiespeicherunter dem Fahrgastraum einzubauen. Die geringeren Massen der EDLC und LIC im Vergleich zu Sekundärzellen verstärken die Wankbewegungen (Drehbewegung um die Längsachse) bei einer Dachmontage nur geringfügig und erlauben daher diese Anordnung.

5.6.4 AUSWAHL DES ENERGIESPEICHERS FÜR DIE ANWENDUNG

Für den Einsatz in einem seriell-hybriden Stadtbusantrieb sind Energiespeicher vorteilhaft, die eine **hohe (gravimetrische) Leistungsdichte** und zumindest eine **mittlere (volumetrischer) Energiedichte** besitzen. Als Vorteil der EDLC gegenüber Sekundärbatterien wurde deren Lebensdauer benannt, die für die Amortisationsrechnung, neben Kosten- und Integrationsaufwand, entscheidend ist. Bei Haltestellenabständen von im Durchschnitt einer Minute und einer jeweils vollständigen Entladung dazwischen, würde sich für EDLC bei 5 h Einsatz pro Tag an 300 Tagen eine Zyklenzahl von 90.000 pro Jahr ergeben. Bei dieser Belastung wäre die Lebensdauer der EDLC ähnlich wie bei größer ausgelegten Sekundärbatterien, bei denen der Ladezustand beim hoch transienten Betrieb in Innenstädten wenig schwankt. Der auf die Masse bezogene und über die Lebensdauer summierte Energieumsatz wurde als Vorteil (149) für EDLC angeführt, da die Degradation der Sekundärzellen schneller voranschreitet wenn ihr gesamter Energieinhalt (*full cycle* bzw. 100 % Entladetiefe DoD) ausgenutzt wird.

Bei Sekundärbatterien mit ihren niedrigeren Leistungsdichten (siehe Tabelle 4) fallen aber durch das höhere Gewicht höhere strukturelle Fahrzeug-Integrationskosten an. Bei den EDLC nimmt, durch die niedrige auf das Volumen bezogene Energiedichte, das umbaute Volumen zu. Der folgende beispielhafte Ansatz für die Dimensionierung des Energiespeichers nutzt denselben Ansatz wie ein *Ragone* Diagramm für Auswahl des Energiespeichers. Es werden die Massen sowohl für EDLC als auch Lithium-Polymer-Akkumulator bei gegebener Leistungsdichte und Energiedichte der Technologien bestimmt:

Formel12: Bemessung Energiespeicher abhängig von Leistungs- und Energiedichte

$$m_{erf} = \max \left[\begin{array}{l} \frac{E_{max}}{m_E} \\ \frac{P_{max}}{m_L} \end{array} \right]$$

- m_{erf} erforderliche Masse Energiespeicher
- m_E Energiedichte J / kg oder Wh / kg
- m_L Leistungsdichte W / kg
- E_{max} Speicherinhalt für die Auslegung J oder Wh / kg
- P_{max} Leistung für die Auslegung W

Über die Energiedichte m_E und den gewünschten Energieinhalt E_{max} von 500 Wh wird die erforderlich Sekundärbatteriemasse in Formel12 bestimmt. Gleiches geschieht über die Leistungsdichte m_L und die gewünschte Maximalleistung P_{max} von 200 kW.

Tabelle 6: Variantenvergleich der für den Energiespeicher erforderlichen Masse für die Zellen

Annahmen für die Berechnung	Lithium Ionen (LiFePO4) (150)	EDLC (151)
Leistungsdichte m_L	1.500 W / kg	6.900 W / kg
Energiedichte m_E	150 Wh / kg	6 Wh / kg

Berechnungsergebnis	Lithium Ionen (LiFePO4) LiFePO4	EDLC
Erforderliche Masse bei 100 % Ausnutzung m_{erf}	133 kg	83 kg

Der EDLC schneidet bei dieser vereinfachten Betrachtung mit 62 % der Masse des LiFePO4-Akkus besser ab. In der Praxis ist es zumindest bei Sekundärbatterien so, dass die entnehmbare Energie bzw. die Spannung bei einer hohen Belastung sinkt. Daher wird im folgenden Kapitel der Entladeverlauf simuliert, um die Betriebsgrenzen und das unterschiedliche Verhalten von Sekundärzellen und EDLC beim Entladen abbilden zu können.

5.6.5 VERGLEICH VON EDLC UND VON LITHIUM POLYMER SEKUNDÄRZELLEN IN DER ANWENDUNG

Bei der Bewertung ist es auch notwendig die Masse für die Temperierung und Montage der Zellen einzuberechnen. Der Anteil der Zellen am Gesamtgewicht beträgt für Lithium-Polymer Sekundärzellen 60 % bis 70 % und kann durch eine funktionelle Integration der Zellen in die Karosserie auf 68 % bis 80 % gesteigert werden (152). Bei EDLC kann bei Berücksichtigung der Tragstruktur ein Wert von ca. 80 % für die Zellen angenommen werden (49). Die Zusatzmasse ist durch die Luftkühlung bei EDLC geringer und der in Tabelle 6 ermittelte Gewichtsvorteil der EDLC bleibt erhalten.

Bei der qualitativen Bewertung der Speichertechnologien durch *Irisbus IVECO 2008* wurde der EDLC erstgereiht, für den zweitgereihten hydraulischen Speicher sprach der Entfall einer Kühlung bei vergleichbarem Gewicht wie beim erstgereihten EDLC. Energiespeicher mit Lithium-Ionen Akkumulatoren nahmen in der integrierten Bewertung aufgrund des etwas höheren Gewichtes und des niedrigeren Wirkungsgrades nur den dritten Platz ein (44). Sie werden aber von Volvo

seit 2011 in einem parallel-hybriden Antriebssystem eingesetzt (153), wobei nun auch eine Plug-In-Version des Antriebes getestet wird (59).

Für die Anwendung ist entscheidend, welche Spannung an der Klemme des Energiespeichers zur Verfügung steht. Der Innenwiderstand verringert diese Spannung und erhöht die Verluste. Besonders im Sommer muss die dadurch entstehende Wärme abgeführt werden. Im Winter haben Lithium Ionen Zellen bei niedrigen Temperaturen einen höheren Innenwiderstand (154). Damit entsteht Wärme, durch die die Temperatur der Zellen und damit deren Kapazität wieder zunehmen. Die für die Aufheizung, auch bei einer externen Temperierung benötigte Energie, ist jedoch ein nicht rekuperierbarer zusätzlicher Aufwand, und ist umso höher, je länger die Auskühlzeiträume zwischen Zeiträumen mit Betrieb sind, siehe (164).

In der Praxis werden für den Energiespeicher Zellen in Serie geschaltet um die gewünschte Spannung und parallel um den gewünschten Energieinhalt zu erreichen. Dabei ergibt sich der Gesamtwiderstand aus der bekannten Kirchhoffschen Maschenregel. Die Zellen selbst werden über eine Serienschaltung von R und parallelen RC Gliedern unter Berücksichtigung einer zeitlichen Abhängigkeit der Kapazität (155) modelliert. Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse dieser Simulation und vergleicht für EDLC und Lithium Polymer Sekundärzellen die Zeit, die mit der eine bestimmte während der Entladung konstante Leistung dem Energiespeicher entnommen werden kann. Als Parameter wird der Betriebsbereich (Spannungsbreite SOC) der Sekundärzellen variiert. Für den zulässigen Schwankungsbereich des SOC wird die Zahl der benötigten Zellen angegeben.

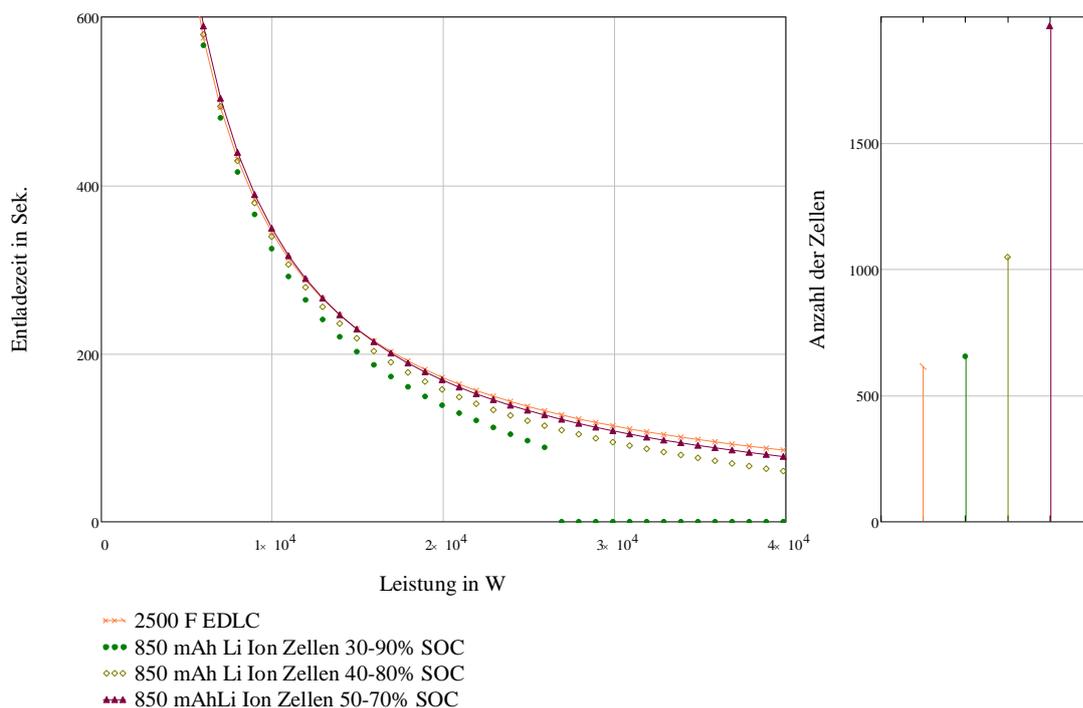


Abbildung 12: Anwendungsbezogener Vergleich EDLC-Lithium-Polymer Sekundärzellen mit unterschiedlicher Auslegung, eigene Berechnung, Basisdaten Li-Ionen Zelle aus (155), Innenwiderstand EDLC 0,025 Ohm

Aus Abbildung 12 kann abgeleitet werden, dass eine zu EDLC vergleichbare Performanz mit Lithium-Polymer Akkus nur mit einer sehr konservativen Auslegung, was den Betriebsbereich betrifft, erzielt werden kann. Wird der Akku nur nach dem benötigten Energieinhalt ohne Reserven ausgelegt, so führt der Innenwiderstand bei steigenden Leistungen zu einem Spannungszusammenbruch. Die Konsequenz daraus ist, dass die Zahl der in der Praxis bei Lithium Polymer Akkus parallel geschalteten Zellen wesentlich größer sein muss, oder

leistungsfähigere Zellen mit einem niedrigeren Innenwiderstand in Serie geschaltet werden müssen.

Unbeschadet der hohen Investitionskosten für EDLC, die aber durch Skaleneffekte bei Großserienproduktion noch fallen können, werden daher in der Simulation EDLC als Energiespeicher genutzt. Das größere benötigte Volumen für die EDLC ist insofern nicht so kritisch zu sehen, da diese am Dach montiert werden können und die Erhöhung der Anströmfläche den Luftwiderstand bei den geringen Geschwindigkeiten kaum erhöht.

5.7 AUSWAHL VON STROMERZEUGER UND ANTRIEBSMOTOR RÄDER

Im folgenden Kapitel wird die Auswahl des Stromerzeugers und des Antriebsmotors für das seriell-hybride Konzept besprochen.

5.7.1 AUSWAHL DES STROMERZEUGERS

Die Stromerzeugung könnte mit den folgenden Technologien durchgeführt werden:

- Verbrennungskraftmaschine (Kraftstoffe: Diesel, Benzin, Erdgas, SynFuels, Wasserstoff etc.)
- Brennstoffzelle (Brennstoffe: Wasserstoff, Erdgas, ggf. flüssige Kraftstoffe mit Reformier)
- Gasturbine (Kraftstoffe: Gas, Syngas, Wasserstoff)

Die Auswahl des Kraftstoffes für die Stromerzeugung umfasst auch Überlegungen zur Betankungsinfrastruktur. Besonders für gasförmige Kraftstoffe, die eine geringere Reichweite zulassen, ist die Betankungslogistik ein wichtiges Thema. Städtische Busflotten mit zentralen Betriebshöfen als zentrale Tankstelle, sind leichter mit Wasserstoff zu versorgen, als Pkw oder NFZ im Fernverkehr. Die im Vergleich zu VKM noch geringere Haltbarkeit und höheren Kosten für Brennstoffzellen (156) haben bisher einen kommerziellen Roll-Out der Brennstoffzelle verhindert. Sie bleiben aber attraktiv, weil sie als Stromerzeuger einen nahezu emissionsfreien und leisen Betrieb ermöglichen würden.

Mit Erdgas betriebene Gasturbinen besitzen zwar einen geringeren Wirkungsgrad als Dieselmotore, aber auch eine geringere Masse. Durch die hohe Drehzahl der Gasturbine könnte der Generator ebenfalls kleiner bauen und leichter sein als bei einer Kombination eines Generators mit einer Verbrennungskraftmaschine. Gasturbinen wurden bereits in seriell-hybriden Bussen erprobt (157), sind in den Kosten aber mangels Massenproduktion (166) deutlich höher angesiedelt. Auch wenn hier eine **Verbrennungs-kraftmaschine** (VKM) in Kombination mit einem Generator der Arbeit zugrunde gelegt wird, ist ein taktisches Energiemanagement mit Gasturbinen ebenso möglich, wie mit den Brennstoffzellen als Stromerzeuger. Bei der Nutzung gasförmiger Kraftstoffe ist zu beachten, dass am Dach des Busses bereits EDLC Raum einnehmen und weniger Platz für Gastanks vorhanden ist.

Nach der Auswahl der VKM als Arbeitsmaschine, betrifft die nächste Entscheidung das Verbrennungsverfahren. Fremdgezündete Motoren hätten als Magermotor das Potential für eine leichtere und effiziente Alternative zum selbstzündenden Dieselmotor, die Notwendigkeit der stöchiometrischen Verbrennung für das Funktionieren des Drei-Wege Katalysators versperrt jedoch die Möglichkeit des Einsatzes eines Magermotors. Eine Veränderung des Zyklus zur Verbesserung der Kraftstoffeffizienz ist ebenso möglich (158), der Ansatz von Miller ist aber besonders in Kombination mit einer Abgasrückführung AGR in der Wirkung umstritten (159). Auch aufgrund der fehlenden Verfügbarkeit von am Prüfstand vermessenen Alternativen zum Dieselmotor wurde daher ein herkömmlicher **Dieselmotor** als *Fuel Converter* gewählt. Es ist jedoch zu erwarten, dass, sollte ein Markt für mobile und leichte Stromerzeuger in der Klasse

von 100 kW bis 500 kW entstehen, die besprochenen Alternativen ebenso weiter entwickelt werden.

Für die Simulation des Motor-Generator-Satzes wurden die Daten eines NFZ-Dieselmotors, der am Institut für Thermodynamik und Verbrennungskraftmaschinen der TU-Graz vermessen und dessen Daten zur leistungsunabhängigen Verwendung der Daten normiert wurden, genutzt (siehe Abbildung 20). Da die gemessenen Verbräuche auch den Antrieb der Lichtmaschine umfassen, ist beim Einsatz der vermessenen VKM im Motor-Generator-Satz ein geringfügig niedrigerer Verbrauch zu erwarten, wenn der Strom für das 24 V Netz im Bus, effizienter als über eine herkömmliche Lichtmaschine möglich, über einen Spannungswandler aus dem Hochvolt-System bezogen wird (zur Berücksichtigung der Energie für Nebenaggregate siehe Kap. 11.3.3).

5.7.2 AUSWAHL DES ELEKTRISCHEN ANTRIEBSMOTORS

Der in weiterer Folge in der Simulation behandelte Ansatz fußt auf einem von *MAN / Siemens* bereits seit 1999 (49) erprobten seriell-hybridem Konzept mit **Zentralantrieb**. Am Anfang der Entwicklung der seriell-hybriden Antriebe stand die Nutzung von Standard-Drehstrom-Elektromotoren, wobei zwei 400 V Maschinen mit einer Nennleistung von je 75 kW mittel Additionsgetriebe (zur Addition der Momente der Antriebsmaschinen bzw. Aufteilung bei Rekuperation) gekoppelt werden mussten. Mittlerweile ist aber eine Antriebsachse mit integriertem Elektroantrieb von *ZF* erhältlich (160). Bei diesem Konzept werden zwei Asynchronmotore mit je 120 kW eingesetzt, womit ein elektrisches Differential realisiert werden kann. Bei den nabennahen Antriebsmotoren entfallen generell im Vergleich zum Zentralantrieb im *MAN / Siemens* Antriebskonzept mit zwei Standard-Synchron-Motoren, die (geringen) Verluste im Additionsgetriebe. Durch im bei nabennahen Antrieben mit einer angetriebenen Achse im Vergleich zum Zentralantrieb mit nur einer elektrischen Maschine halb so großen Maschinen treten jedoch etwas höhere Verluste in den Motoren auf. Dies wird aber erst bei zwei angetriebenen Achsen merkbar.

Asynchronmotore (ASM) hätten zwar bei höchsten Drehzahlen einen Wirkungsgradvorteil gegenüber mit Permanentmagneten erregten Synchronmaschinen (PMSM). Bei niedrigeren Drehzahlen und höheren Momenten, wie sie im Stadtverkehr beim Anfahren ohne mit fixer Übersetzung vorkommen, haben ASM aber geringere Wirkungsgrade, als eine PMSM (166) (167) (168). Für die eigene Simulation wurde daher beim Elektroantrieb – dem Stand der Technik entsprechend – eine permanent erregte Synchronmaschine PMSM verwendet. Die Leistungen der in Pkw mit Hybridantrieb verbauten PMSM mit 123 kW (161) und die Verfügbarkeit von PMSM bis 400 kW im Industriebereich (162) zeigen auf, dass es kein technisches Problem wäre die derzeit genutzten zwei Asynchronmaschinen durch eine einzige Maschine zu ersetzen (wenn keine Einbaurestriktionen dagegen sprechen).

6 ENERGIEVERLUSTE UND ENERGIEBILANZ SERIELL-HYBRIDE ANTRIEBSSYSTEME

6.1 EINLEITUNG

Das taktische Energiemanagement für einen Linienbus mit seriell-hybridem Antrieb soll anhand einer Simulation analysiert und optimiert werden. Für diese Simulation ist es nötig das Antriebssystem mit einem mathematischen Modell nachzubilden. Im folgenden Kapitel werden dazu die Grundlagen für die Modellierung der mechanischen und elektrischen Verluste, wie sie in seriell-hybriden Antriebssystemen auftreten, dargestellt. Am Ende des Kapitels werden die sich aus den Verlusten ergebenden Energieströme in einem Sankey-Diagramm präsentiert, um die einzelnen Verluste in ihrer Bedeutung für den Gesamt-Kraftstoffbedarf einordnen zu können. Mit der Bewertung der Verluste können im darauf folgenden Kapitel 7 die Ziele für die Optimierung definiert und der Optimierungsansatz für das taktische Energiemanagement entwickelt werden.

6.2 MECHANISCHE VERLUSTE

Bei konventionellen Dieselmotoren dominieren bei den mechanischen Verlusten, wie in Abbildung 13 gezeigt, mit ca. 60 % die internen Reibungsverluste im Zylinder (Kolben- und Kolbenringreibung). Danach folgen die Aufwendungen für die sonstigen Verbraucher wie Öl- und Wasserpumpe, Generator (Lichtmaschine) mit ca. 40 % und die Verluste in den Lagern (Kurbeltrieb). Der Ventiltrieb verursacht die geringsten Verluste.

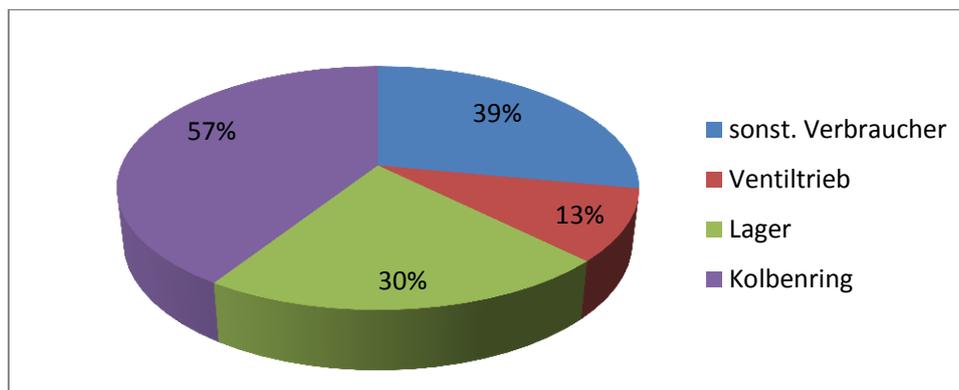


Abbildung 13: Ungefähre Aufteilung der mechanischen Verluste im Dieselmotor (167)

Bei einem Motor-Generator-Satz ist das Umfeld der VKM ein anderes, da die VKM Teil eines Stromerzeugers ist. Es muss daher untersucht werden, inwieweit die Daten einer Prüfstandsmessung einer VKM im Vergleich der betriebsweisen von seriell-hybriden Antrieben genutzt werden können, indem sie die Verluste auch beim Einsatz als Stromerzeuger richtig abbilden. Wasserpumpe, Lichtmaschine und Lüfter sind in der Motor-Blackbox-Simulation enthalten. Beim modellierten seriell-hybriden Antrieb existieren kein Retarder, keine Kupplung und nur eine fixe Übersetzung Motor-Differential, da VKM und Generator direkt verbunden werden, und kein hydraulischer Wandler. Durch den Direktantrieb beim HEF fällt daher nur die Reibung in Antriebswelle, Additions- und Differentialgetriebe an.

Die Reibungsverluste sind in den Wirkungsgraden der elektrischen Antriebsmaschine enthalten. Wenn diese als Generator betrieben wird, ist dies zu berücksichtigen. Beim zweiten rotierenden Aggregat, dem Motor-Generator-Satz, fallen, wenn bei der Kopplung zwischen der VKM und dem Generator kein Getriebe genutzt wird, dabei auch keine zusätzlich zu berücksichtigenden mechanischen Verluste an. Die Lagerreibung ist **bei den Effizienzangaben der Maschinen**

(bzw. Verbrauch bei der VKM) durch Nutzung eines entsprechenden Black-Box Modells (siehe Kap. 6.3) bereits inkludiert und wird in der Simulation nicht separat berechnet. Da als Antriebsmaschine eine einzelne PMSM, und nicht zwei hochdrehender Asynchronmotoren mit Additions- und Reduktiongetriebe verwendet werden, kann ein einstufiges Getriebe und in Summe für dieses und das Differenzial überschlägig ein Verlust von 2 % angenommen werden.

6.3 ELEKTRISCHE VERLUSTE

Beim seriell-hybriden Antrieb wird, im Unterschied zum dieselektrischen Betrieb, Energie auch über eine mittelfristig wirkende Speichereinheit geführt. Abzüglich elektrischer Verluste, kann die im Motor-Generator-Satz in elektrischen Strom umgewandelte Energie direkt von der Leistungselektronik des Antriebes aufgenommen werden. Elektrische Verluste entstehen, da der Strom immer über eventuell vorhandene Hoch- oder Tiefsetzsteller fließt, mindestens zwischen Motor-Generator-Satz und EDLC, da das Spannungsniveau im EDLC je nach Ladezustand stark schwankt. Da sich beim seriellen-hybriden Antrieb durch die elektrisch in Serie geschalteten Maschinen eine längere Wirkungsgradkette ergibt, muss auf hohe Einzelwirkungsgrade bei der Energieumwandlung in den Maschinen geachtet werden. Im Folgenden wird die Effizienz der elektrischen Komponenten des seriell-hybriden Antriebssystems daher ausführlicher besprochen.

6.3.1 EFFIZIENZ ELEKTROMASCHINEN

Beim simulierten seriell-hybriden Antrieb werden eine Elektromaschine im Motor- und Generatorbetrieb, und eine elektrische Maschine, falls ein Anlasser verbaut ist, ausschließlich im Generatorbetrieb genutzt.

Für den Wirkungsgrad der Elektromaschinen wurden die durch das *Oak Ridge National Laboratory* gemessenen Werte (169) (170) einer über Permanentmagnete erregten Synchronmaschine PMSM mit 50 kW Maximalleistung und 400 N m Maximalmoment herangezogen, wie sie im 2004 *Toyota Prius* verwendet wurde. Durch diesen Black-Box-Ansatz konnte wurde die Modellierungstiefe reduziert und dadurch können mehr Varianten pro Zeiteinheit berechnet werden. Beim Vergleich der Regelungsverfahren des seriell-hybriden Antriebes ist durch die erwartete Ähnlichkeit der Maschinenkennfelder zwischen der gemessenen und verwendeten elektrischen Maschine, ebenso wie bei der VKM eine Gültigkeit der abgeleiteten Aussagen zu erwarten. Eine einfache mathematische Beschreibung der elektrischen Maschinen über Differentialgleichungen könnte die Realität nicht genau genug abbilden (171). Die Simulationsumgebung erlaubt nur die Nutzung eines Fließkommaprozessors. Der Berechnungsaufwand bei einer Berechnung der elektrischen Antriebsmaschinen für jeden Zeitschritt – selbst bei einem vereinfachten Ansatz mit der Lösung von Differentialgleichungen ohne Berücksichtigung der Flusssättigung – wäre daher zu hoch. Der Verwendung von Messdaten wurde daher Vorrang eingeräumt. In hoher Auflösung publizierte Diagramme (169) (170) konnten pixelgenau in Wirkungsgradtabellen umgewandelt werden und lagen dort für jede Kombination aus Drehmoment und Drehzahl in einer Auflösung von 1 % vor. Für die Leistungselektronik war, zur Entfernung eingezeichneter Labels ein manueller Zwischenschritt mit Bildbearbeitung nötig. Die Genauigkeitsanforderungen sind aber bei der Leistungselektronik, wegen der allgemein sehr hohen und relativ konstanten Wirkungsgrade nahe des optimalen Arbeitspunktes des Generators gering, und es war mit den so erhaltenen Daten eine gute Optimierung des Arbeitspunktes des Motor-Generator-Satzes möglich. Die Arbeitspunkte bei der Antriebsmaschine sind für alle gerechneten Varianten einer Fahrt gleich. Daher wirken sich Fehler beim Vergleich der Betriebsarten des taktischen Energiemanagements des seriell-hybriden Antriebes weniger aus. Abbildung 14 zeigt, mittels symbolischer Grafiken,

die Vorgehensweise bei der Nutzung von publizierten Diagrammen zur Gewinnung von Effizienz-Daten elektrischer Maschinen über Bildverarbeitung.

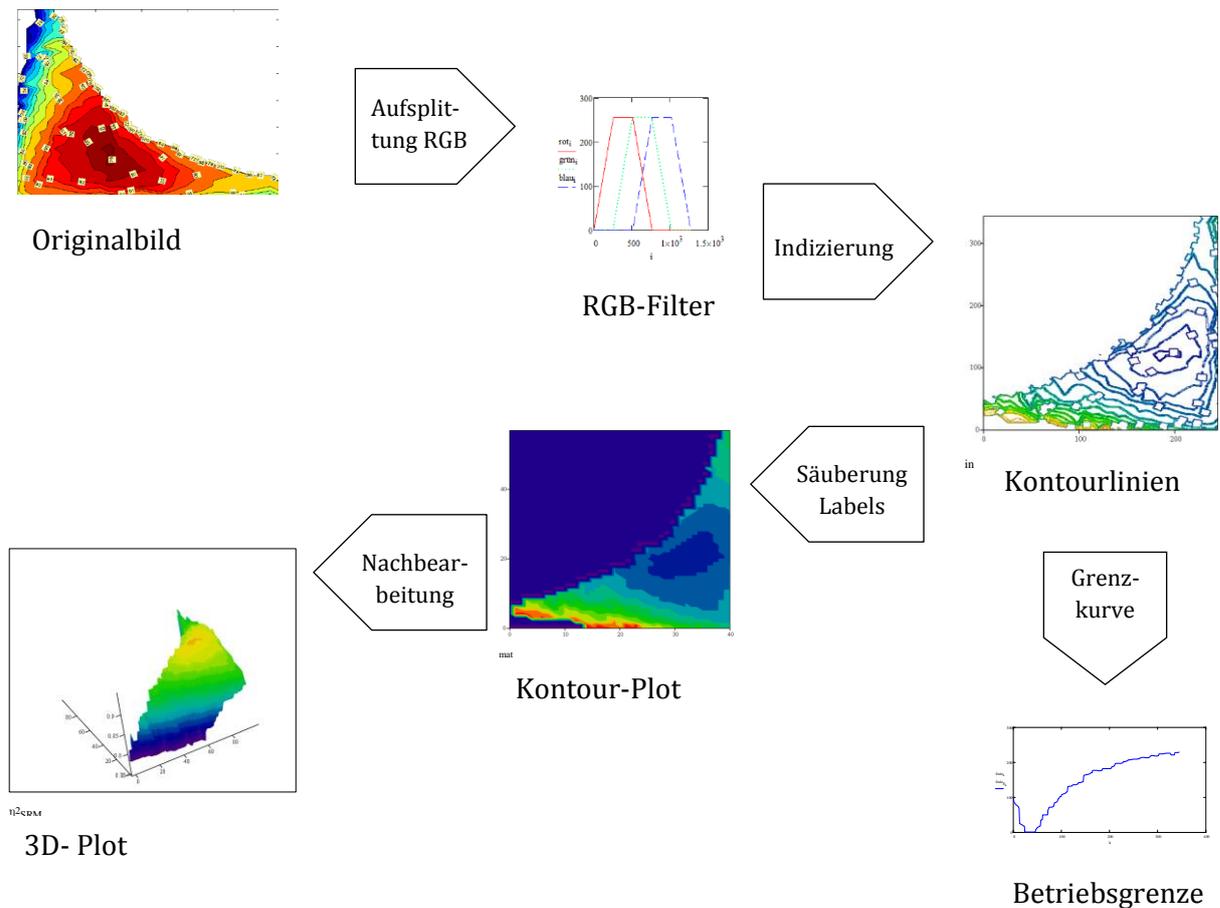


Abbildung 14: Vorgehensweise bei der Datengewinnung für die Optimierung des Betriebspunktes des Motor-Generator-Satzes aus einer graphischen Darstellung von Messdaten (Kontur-Plot mit eingezeichneten Datenlabels).

Ergebnis des in Abbildung 14 gezeigten Prozesses ist eine 100 x 100 Matrix mit einem von auf Prozent normiertem Moment und normierter Drehzahl abhängigen Wirkungsgrad. Dabei wird auch die Betriebsgrenze berücksichtigt. Die Matrix wird zur direkten Verwendung in der Simulation für relative Drehzahl und relative Leistung umgerechnet. Damit können die Wirkungsgrade in der Simulation, wie in Formel 13 gezeigt, bestimmt werden.

Formel 13: Umsetzung Wirkungsgradberechnung im Programm Motorgenerator

$$\eta_{MG}(n_{rel}, P_{rel}) = M_{\text{runden}(100 n_{rel}), \text{runden}(100 P_{rel})}$$

- η_{MG} Funktion zur Ermittlung des Wirkungsgrades der elektrischen Maschine
- M Matrix mit dem Wirkungsgrad
- n_{rel} relative Drehzahl, bezogen auf die maximale Betriebsdrehzahl der elektrischen Maschine
- P_{rel} relative Leistung, bezogen auf die maximale Betriebsleistung der elektrischen Maschine

Bei der Leistungselektronik (Controller, Inverter) für die elektrischen Maschinen nimmt der relative Verlust mit steigender Zwischenfrequenz zu (172). Es wird die Zwischenspannung in modernen Konzepten mit der Last verändert oder das Schalten der Leistungselektronik erfolgt beim so genannten *soft switching* (173), wenn keine Spannungsdifferenzen vorhanden sind. Hier wurde ebenso wie bei den Maschinen ein Black-Box-Ansatz für die Modellierung gewählt, für die Gesamtverluste der Leistungselektronik (Strom- und Schaltverluste) lagen ebenfalls Messdaten

des *Oak Ridge National Laboratory* für eine real existierende Leistungselektronik aus Hybridfahrzeugen vor:

- Leistungselektronik (Motor Inverter) des 2004 *Toyota Prius* (169)
- Kombination Leistungselektronik und einem PMSM Elektromotor für 500 V und 50 kW für den 2004 *Toyota Prius*

Die Daten für die Kombination aus Motor und Leistungselektronik wurden ebenfalls, wie in Abbildung 14 gezeigt, in eine 100 x 100 Matrix übertragen. Der Wirkungsgrad der Leistungselektronik hat, in einer ähnlichen Darstellung wie Abbildung 15, ab 1000 U/min einen sehr hohen Wirkungsgrad:

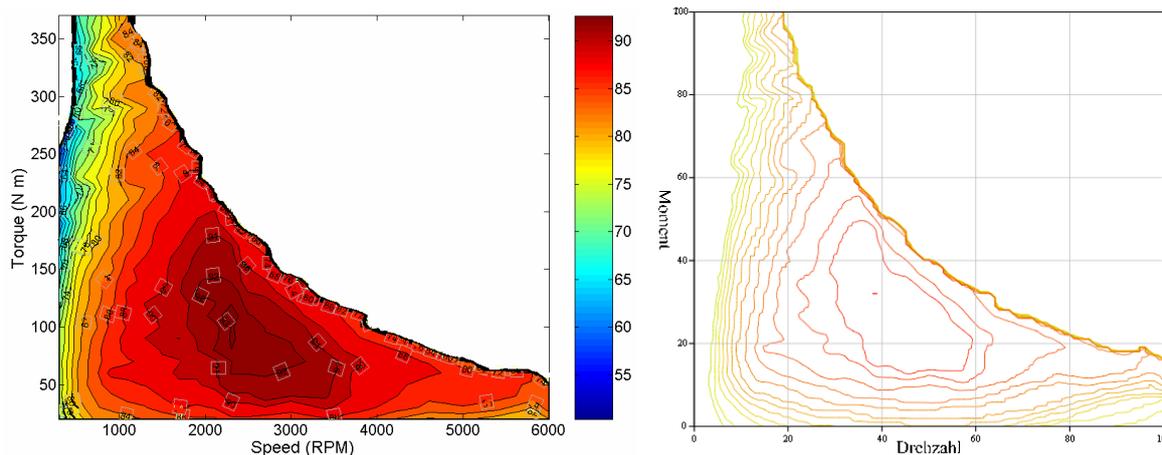


Abbildung 15: kombinierter Wirkungsgrad Elektromotor und Leistungselektronik, eingefärbtes Original und Ergebnis der Auswertung

Für die Antriebsmaschine wurde der Wirkungsgrad, mittels Konturplots, aus einer anderen, graphisch etwas schlechter aufgelösten Literaturstelle (174) genommen, die jedoch Messwerte für zwei Quadranten zeigt, um zwischen Motor- und Generatorbetrieb der Antriebsmaschine unterscheiden zu können. Dabei sind besonders Bereiche mit kleinen Drehzahlen und hohen Momenten bei der Interpolation kritisch zu sehen, aber auch in der Originalgrafik nicht dargestellte Bereiche bei sehr kleinen Momenten. Da hier bei Vortrieb und Rekuperation Verluste anfallen, ist eine weitergehende Optimierung der elektrischen Maschinen sinnvoll, ein Potential von 5,5 % bis 10 % wird erwartet (183).

Vor der Simulation der taktischen SOC-Regelung, wird der Wirkungsgrad des Antriebsmotors bzw. der Leistungselektronik für die benutzten Fahrkurven mit der in die Drehzahl umgerechneten Geschwindigkeit vorberechnet, wie in Formel 14 gezeigt:

Formel 14: Berechnungsformel für die relative Drehzahl der elektrischen Antriebsmaschine in der Simulation

$$n_{mot\ rel} = \frac{v_{Fahrzeug}}{d_{Rad} \pi} \frac{i_{end}}{n_{nenn}}$$

$n_{mot\ rel}$ relative Drehzahl der elektrischen Antriebsmaschine

$v_{Fahrzeug}$ translatorische Fahrzeuggeschwindigkeit in m / s

i_{end} Endübersetzung Hybridantrieb 19,5

d_{Rad} Reifendurchmesser 33,1 Zoll = 0,841 m

n_{nenn} Nenndrehzahl der elektrischen Maschine (6000 U / min = 100 Hz)

Während der Motor-Generator-Satz nur einzelne vorher definierte Punkte anfährt, wird die Antriebsmaschine für jeden Zeitschritt mit Angaben simuliert, die auf GPS-Messungen basieren.

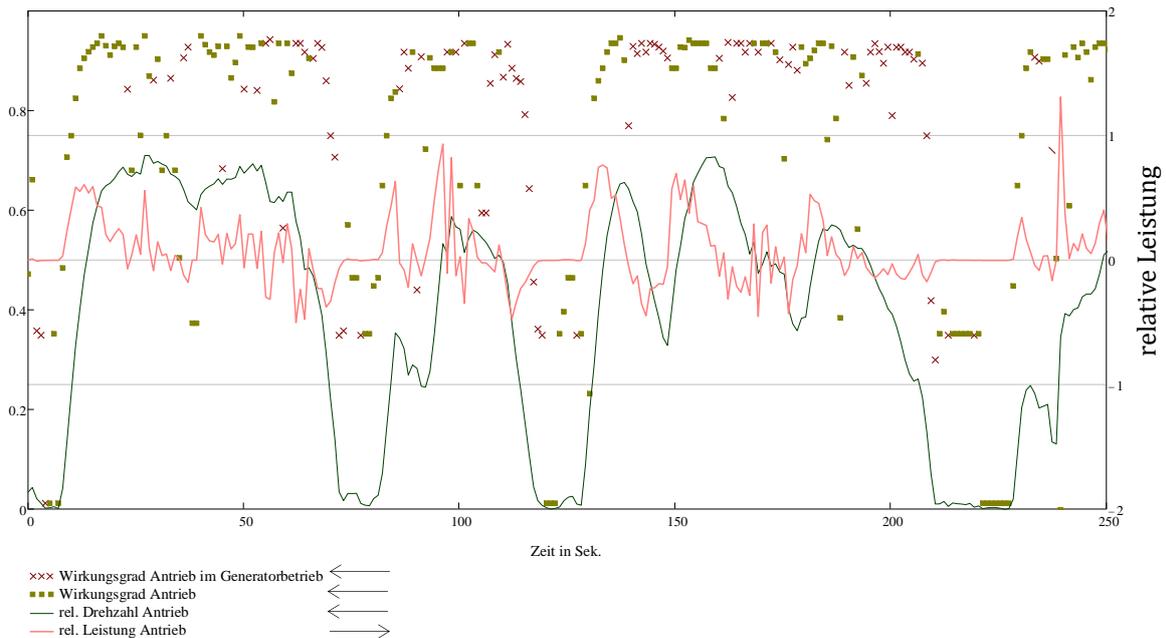


Abbildung 16: Beispiel für das Ergebnis der Vorberechnung der Wirkungsgrade des Antriebs auf Basis der aus den GPS Daten ermittelten relativen Leistung (rechte y-Achse) und Drehzahl

Abbildung 16 zeigt, dass die Wirkungsgrade des elektrischen Antriebes bei sehr geringen relativen Drehzahlen stark absinken. Es ist wegen eventueller fehlerhaften GPS-Daten wichtig zu definieren, wie mit Grenzüberschreitungen im Kennfeld der elektrischen Maschine umgegangen werden soll. Abbildung 17 zeigt die Betriebspunkte einer Fahrt im Kennfeld.

normierte Darstellung 0-100% (Leistung -100% bis +100%)

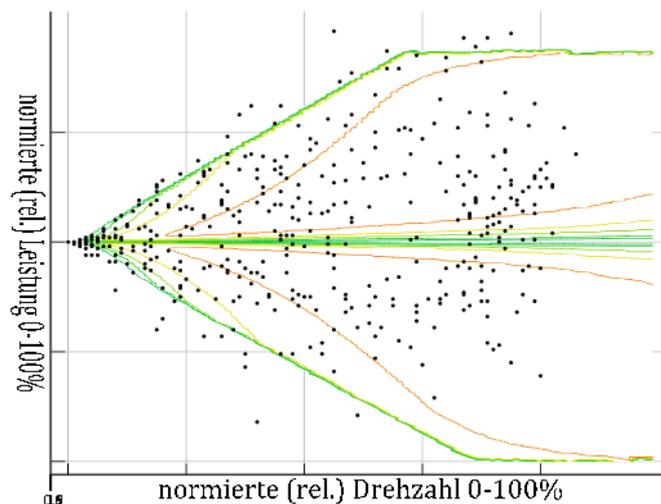


Abbildung 17 Arbeitspunkte im Kennfeld der Antriebsmaschine für Fahrt 1 (ohne Erhöhung der Nennleistung)

Für den elektrischen Antrieb wäre DIN EN 60349 (182) anzuwenden. Ein Elektromotor muss danach während 15 Sekunden, je nach Rotorbauart, mit dem 1,35- bis 1,5-Fachen Moment überlastet werden können, ohne die Synchronizität zu verlieren. Die infolge der im Rotor der Antriebsmaschine versenkten Magneten angenommene obere Grenze von 150 % für die Maximalleistung wurde bei den für die Simulation genutzten Fahrkurven mit ca. 600 Sekunden

Dauer (je nach Fahrt 561 bis 686 s) für positive Leistungen maximal 8 Sekunden und für negative Leistungen maximal zwei Sekunden überschritten (siehe auch Abbildung 17). Eine Begrenzung der Leistung in der Simulation, hilft Extrema, die aus der Qualität des GPS-Signals resultieren zu eliminieren. Um das Ergebnis durch Verlassen des interpolierten Kennfeldes nicht zu verfälschen, werden zusätzlich (untere) Grenzen für die Wirkungsgrade eingezogen. Dabei wurde eine Variante verworfen, die bei Überlast den Wirkungsgrad auf der Grenzkurve nimmt und von einer deutlichen Verbesserung der minimalen Wirkungsgrade ausgeht (70 % bzw. 75 % Gesamtwirkungsgrad inkl. Controller für Generator bzw. Motorbetrieb der Antriebsmaschine). Stattdessen wurde schlussendlich, um konstante Wirkungsgrade durch diese Annahmen zu vermeiden, die Nennleistung auf 135 % erhöht und bei den Wirkungsgraden Grenzen von 45 % bzw. 50 % benutzt, auch wenn dies in Summe zu höheren Verbräuchen führt. Die Übersetzung zwischen Motor und Rad wurde so angenommen, dass im Testabschnitt die maximale relative Drehzahl der Antriebsmaschine nach Formel 14 nicht überschritten wird.

6.3.2 SPANNUNGSANPASSUNG ÜBER HOCH- TIEFSETZ-STELLER

Bei der Nutzung eines EDLC als Energiespeicher, hängt die Spannung des EDLC vom Ladezustand SOC ab. Je nach Bauart der elektrischen Antriebsmaschine und Inverterbauart (Leistungselektronik der Elektromaschine) treten bei voll geladenem EDLC bei der Rekuperation und niedriger Geschwindigkeit des Fahrzeuges größere Spannungsdifferenzen auf. Daher ergibt sich zumindest die **Notwendigkeit der Spannungsanpassung** zwischen der Stromsammelschiene, die sowohl mit der Leistungselektronik des Motors als auch der Leistungselektronik des Generators verbunden ist, und dem EDLC. Im Fahrbetrieb treten dabei drei verschiedene Zustände für die Stromflüsse auf, wofür die Aufgabenstellungen für die Spannungsregelung in Tabelle 7 beschrieben werden.

Tabelle 7: Unterscheidung von Fällen für die Spannungsregelung im Fahrbetrieb

Zu- und Abflüsse	Aufgabenstellung
Stromeinspeisung vom mittels VKM angetriebenen Generator in den EDLC	Einspeisen mit einer dem SOC entsprechenden Spannung in den EDLC Drehzahl des Generatorsatzes soll so festgelegt werden, dass der Gesamtwirkungsgrad bei gegebener Spannung im EDLC maximal wird.
Entnahme von Strom aus dem EDLC für den Antrieb	Der Antrieb benötigt, abhängig von der Art der elektrischen Maschine, eine der Geschwindigkeit proportionale Spannung, die aus der EDLC-Spannung transformiert werden muss
Einspeisen von rekuperiertem Strom vom Antriebsmotor in den EDLC	Abhängig von der Art der elektrischen Maschine ist die Ausgangsspannung proportional zur Geschwindigkeit und damit ist eine Spannungswandlung nötig.

Wenn die Maximalspannung des EDLC im Beispiel mit 630 V (je nach Konzept auch bis 750 V) wesentlich höher als die des Generatorsatzes bzw. Antriebes mit Synchronmaschinen von 400 V ist, kann eine konstante Hochsetzung der Spannung zwischen Leistungselektronik des Generators und EDLC vorgesehen werden. Da die maximalen Spannungsniveaus auf der Stromsammelschiene und dem EDLC jedoch gleich hoch sein sollen, die Spannungen aber auf beiden Seiten stark schwanken können, wird hier eine variable Spannungsanpassung mit Hochsetz-Tiefsetz-Steller (*Buck-Boost Converter*) vorgesehen. Die Verluste bestimmen sich im *Boost Betrieb*, also als Hochsetzsteller, aus zwei Anteilen, einmal bei der Erhöhung der Spannung und dann bei der Spannungsregelung (175).

Für die Black-Box Simulation wurden aus den publizierten von den Spannungsverhältnissen abhängigen Wirkungsgradkurven des Hochsetz-Tiefsetz-Stellers die Werte rechnerunterstützt von den Konturlinien (176) abgelesen und über ein in Formel 15 gezeigtes Wichtungsverfahren interpoliert:

Formel 15: Formel zur Wichtung bei der Ermittlung von Ergebnissen zwischen Einzelwerten einer Matrix

$$\text{gewichteter interpolierter Wert} = \frac{\sum_0^n \text{Punkte} \frac{1}{\text{Abst}_n} \text{Wert}_n}{\sum_0^n \text{Punkte} \frac{1}{\text{Abst}_n}}$$

Wert_n Nachbarwerte

Abst_n Abstand des Nachbarwertes

Die n Punkte für die Wichtung werden aus einer Liste genommen, in der die Nachbarpunkte zum Betriebspunkt nach ihrem Abstand Abst sortiert werden. Die ursprüngliche Konturliniengrafik wurde dadurch in eine stetig verlaufende 3D-Kurve umgewandelt wie Abbildung 18 zeigt.

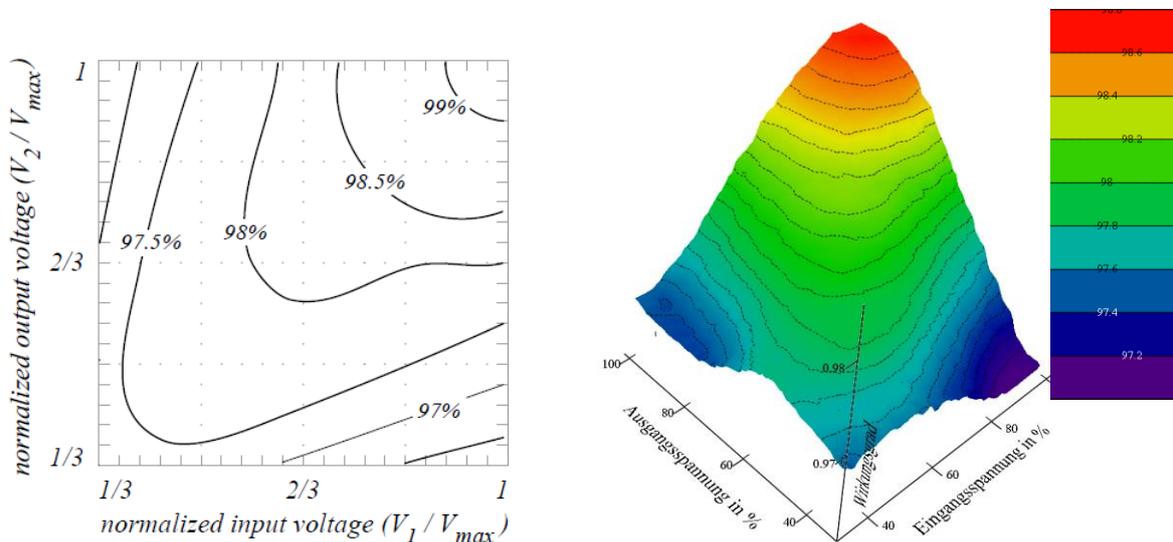


Abbildung 18: Spannungabhängige Effizienz Hochsetz-Tiefsetz-Steller (über Bildverarbeitung aus dem Konturdiagramm (176) abgelesen und interpoliert)

Zusätzlich zu den nur vom **Spannungsverhältnis zwischen elektrischer Maschine und EDLC abhängigen Verlusten** nach Abbildung 18, wurde noch ein **von der Leistung abhängiger Verlust** im Hochsetz-Tiefsetz-Steller überlagert. Es wurden die Wirkungsgrad-Werte der obersten Kurve aus Abbildung 19 genommen und zwischen den Werten interpoliert.

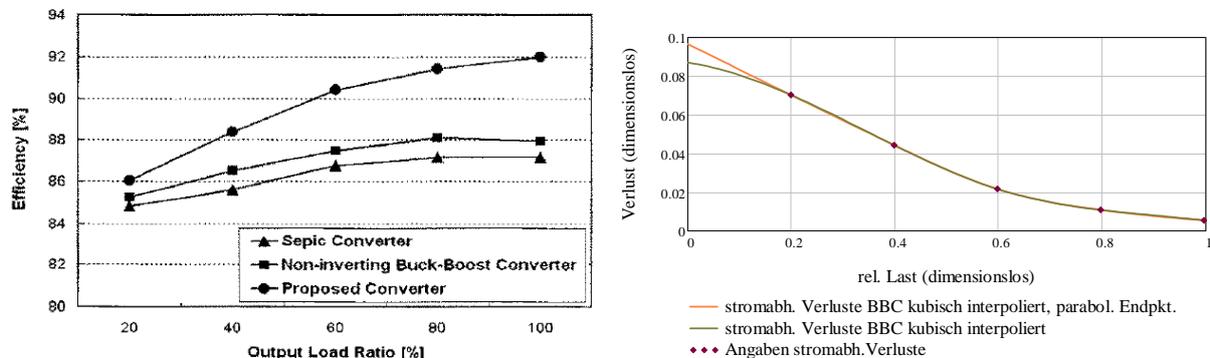


Abbildung 19: Stromabhängige Verluste bei der Spannungsanpassung im Hochsetz-Tiefsetz-Steller in Abhängigkeit von der normierten Leistung (177)

Die hier abgelesenen Wirkungsgrade werden skaliert, sodass der Maximalwert eins bzw. 100 % beträgt, weil diese Verluste am Vollastpunkt bei den in Abbildung 18 dargestellten von der Spannung abhängigen Verlusten bereits berücksichtigt sind. Die Art der Extrapolation der Endpunkte bei der kubischen Interpolation (siehe Abbildung 19) beeinflusst nur das Verhalten unter 20 % Last, für die Berechnungen wurden parabolische Endpunkte angenommen, die zu einem größeren Abfall bei kleinen Lasten führen.

6.3.3 OHMSCHE VERLUSTE VERBINDUNGSLEITUNGEN

Beim elektrischen Direktantrieb sind die Elektromotoren in das Rad integriert oder über eine kurze Welle angebunden, wodurch eine elektrische Zuleitung zu jedem Rad erforderlich ist, allerdings mit nur mit einem Teil des Stroms. Bei einem Zentralantrieb, wie beim MAN-Hybridbus, werden die Elektromotore direkt hinter der Achse angeordnet, um eine Niederflur-Konstruktion des Buses zu ermöglichen. Je nach Konfiguration sind dabei unterschiedliche Leitungslängen erforderlich. MAN hat im zweiachsigen hybrid-elektrischen Bus die EDLC als Energiespeicher auf das Dach des Buses und die Leistungselektronik unter den Boden des Fahrzeuges direkt darunter platziert. Der Generator wiederum befindet sich im Heck. Dies bedeutet, dass eine längere Hochvoltleitung zwischen Generator bzw. Motor hinter der Achse und der Leistungselektronik, sowie der Leistungselektronik und den EDLC am Dach nötig ist. Formel 16 zeigt den Berechnungsgang für die Abschätzung der Ohmschen Verluste in der Hochvoltleitung. Es wird hier angenommen, dass höherfrequente Anteile und Blindströme bei der Berechnung vernachlässigt werden können.

Formel 16: Berechnung der Ohmschen Verluste Leistungsübertragung in Kabeln

$$R = \omega_{Cu} \frac{l_L}{A_L}$$

$$P_{verl} = I^2 R$$

- ω_{Cu} spezifischer Widerstand Ohm / m pro m^2 Querschnittsfläche
- l_L Leiterlänge in m
- A_L Leiterquerschnitt in m^2
- I Strom in A
- R Widerstand in Ohm

Die Leitungsverluste werden dadurch gering gehalten, dass mit hohen Spannungen (bis 750 V) gearbeitet wird und große Kabelquerschnitte gewählt werden. Als Grundlage der Berechnung wird ein Temperatur-abhängiger spezifischer Widerstands (178) benutzt. Die Ohmschen Verluste betragen, unter Nutzung der bei 444 A erforderlichen Querschnitte (179), für Silikon-isolierte Hochvolt-Fahrzeuggesteuerungen von 50 mm² bei einer Leitungslänge von 5 m bei 200 kW und 450 V nur 0,18 %. Daher wurden die Ohmschen Verluste in der Simulation vernachlässigt.

6.3.4 VERLUSTE IM ENERGIESPEICHER (EDLC)

Der Innenwiderstand beträgt typischerweise 0,7 mOhm bis 1 mOhm für eine 2,5 V EDLC-Zelle (180). Dieser Innenwiderstand steigt, wie bei den anderen Energiespeichern mit Elektrolyten auch, mit fallender Temperatur (181). Es ist aber im Betrieb keine externe Beheizung nötig, da sich der EDLC durch den Innenwiderstand selbst erwärmt. Aufgrund der stärkeren Alterung der EDLC bei höheren Temperaturen ist jedoch eine Kühlung erforderlich. Die Berechnungen der Verluste werden in der Simulation für konstante Temperaturen durchgeführt, da eine thermische Konditionierung durch eine geregelte Kühlung über Lüfter angenommen, im Falle dass der Fahrtwind nicht ausreicht. Durch den unterbrochenen Betrieb der Lüfter wurde deren Energiebedarf vernachlässigt.

Im Modell der Simulation wurden zwei variable Verluste der EDLC berücksichtigt. Dabei ist die als **Leckagestrom** bezeichnete geringe Selbstentladung, die sich als Resultat der Serienschaltung parallel geschalteter Kapazitäten und Widerstände ergibt (182), niedrig. Die Selbstentladung beträgt bei Kondensatoren mit 1.800 Farad bzw. 2.600 Farad bei 25° C 4 mA bis 5 mA und steigt mit der Temperatur und bei überhöhter Kondensatorspannung (183). Es wurde vereinfachend ein konstanter Leckagestrom angesetzt, die variable Verlustleistung ergibt sich durch Multiplikation des Leckagestroms I_{Leck} mit der Spannung des Kondensators U_{EDLC} , wie in Formel 17 gezeigt:

Formel 17: Berechnung Verlustleistung durch Leckagestrom EDLC

$$P_{Leckagestrom} = I_{Leck} U_{EDLC}$$

$P_{Leckagestrom}$	Verlustleistung Leckage
I_{Leck}	Leckagestrom EDLC
U_{EDLC}	Spannung EDLC

Die Verlustleistung durch den konstanten kleinen Leckagestrom der EDLC ist von der Spannung des EDLC abhängig. Da die Simulation nur Energieströme abbildet, wird die Spannung in der Simulation aus dem aktuellen Energieinhalt des Speichers W_{Sp} und der EDLC Kapazität C_{EDLC} berechnet, wie in Formel 18 gezeigt.

Formel 18: Berechnung Spannung im EDLC

$$U_{EDLC} = \sqrt{\frac{2 W_{EDLC}}{C_{EDLC}}}$$

U_{EDLC}	Spannung im EDLC
W_{EDLC}	Energieinhalt EDLC
C_{EDLC}	Kapazität EDLC

Zusätzlich ist noch ein Verlust vorhanden, der proportional zum durch den EDLC fließenden Strom ist. Dieser **Ohmsche Verlust** wird mit der Differenz der zu- und abfließenden Ströme und dem Innenwiderstand des EDLC berechnet. Von den drei möglichen Energieströmen zu- und vom EDLC können jeweils zwei gleichzeitig auftreten:

- Entweder Antriebsbedarf **oder** Rekuperationsleistung
- Einspeisung Generatorsatz

Diese Ströme verursachen Ohmsche Verluste. Je geringer der Ladezustand des EDLC, desto größer wird wegen Formel 18 die Stromstärke bei konstanter elektrischer Nettoleistung.

Formel 19: Berechnung Ohmsche Verluste EDLC

$$P_{\text{Ohmsche Verluste}} = I_{\text{netto}}^2 ESR_{\text{EDLC}}$$

$P_{\text{Ohmsche Verluste}}$	Verlustleistung Ohmsche Verluste
I_{netto}	Nettostrom vom/zum EDLC
ESR_{EDLC}	Innenwiderstand EDLC

Es wurden, auf der Basis positiver Erfahrungen aus der Praxis (184) und Expertenmeinung (45) (185), keine Verluste für den Spannungsausgleich zwischen den Zellen im EDLC berücksichtigt, der die im Betrieb auseinanderdriftenden Spannungen der einzelnen Kondensatoren wieder zusammenführt.

6.3.5 VERLUSTE IN DER VKM

Grundlage der Berechnung der VKM sind so genannte *scattered data*, d. h. Messpunkte, die durch das Anfahren von zweidimensionalen Betriebszuständen (Drehzahl, Last) entstehen. Dazu konnten vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz dankenswerterweise bereit gestellte Messdaten für Verbräuche in g / kWh und kW Nennleistung aus dem Projekt ARTEMIS (101) genutzt werden.

Die Originaldaten, abzüglich der Daten des Schubbetriebes, der bei einem Motor-Generator-Satz nicht bzw. eingeschränkt beim Auslaufen auftritt, wurden nach verschiedenen Versuchen schlussendlich in *Matlab* mit der Funktion *griddata* linear interpoliert um Wellen zu vermeiden und erst danach die Umrechnung des auf die Nennleistung normierten stündlichen Verbrauchs (in g / h pro kW) in g / kWh vorgenommen. Die Ergebnisse wurden dann in eine Tabelle exportiert und in *Mathcad* für die weiteren Berechnungen importiert. Bei der Berechnung werden neben relativen Drehzahlen, anstatt von Drehmomenten, relative Leistungen (Last) in den Funktionen verwendet, die den Verbrauch bzw. die Emissionen zurückgeben. Zusätzlich wurde noch die bei einer bestimmten Drehzahl maximal mögliche Leistung separat ausgewertet. Diese stellt die obere Grenze für die Interpolation dar und die Flächen müssen dort abgeschnitten werden. Daraus ergibt sich in Abbildung 20 folgende Darstellung für den spezifischen Verbrauch in Abhängigkeit von Drehzahl und Last:

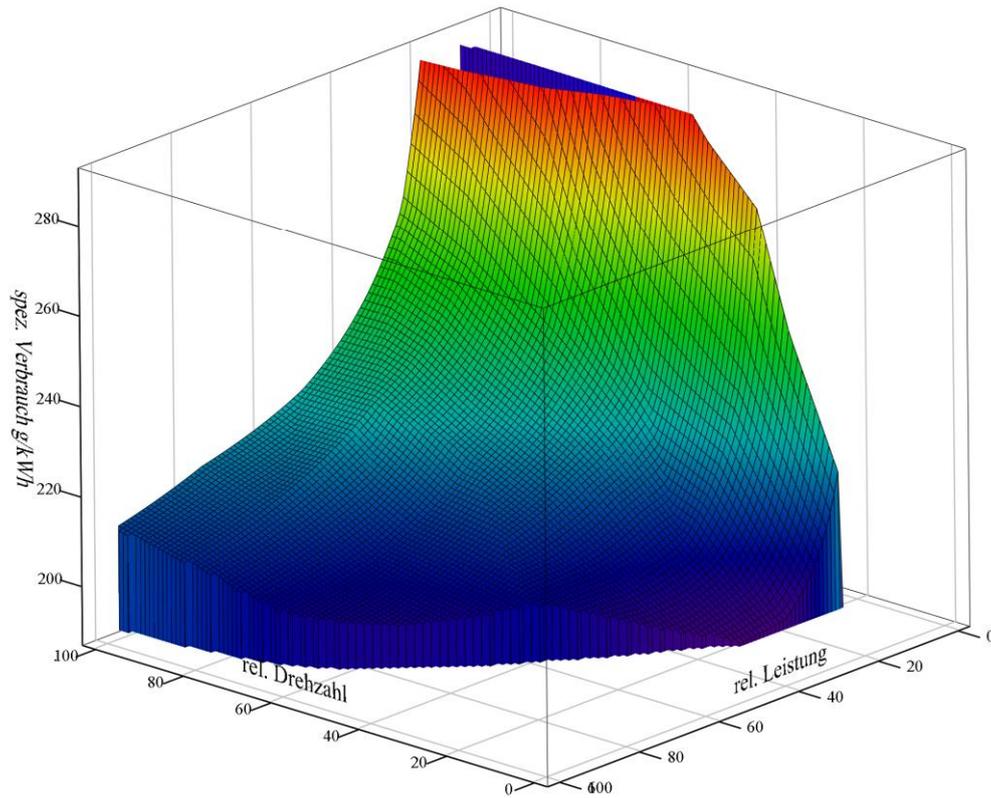


Abbildung 20: spezifischer Verbrauch Dieselmotor in Abhängigkeit von relativer Drehzahl und relativer Leistung⁵

Zusätzlich wurde aus dem ARTEMIS Modell der TU-Graz auch die Berechnung der Dynamik-Korrektur übernommen. Nach der Vorberechnung der transienten Parameter in Abhängigkeit vom Einsatz des Stromerzeugers, erfolgte die Korrektur der über die Matrizen ermittelten Verbräuche und Emissionen im Nachlauf entsprechend des in Tabelle 8 dargestellten Pseudocodes.

⁵ Interpolation der Messdaten der TU-Graz (103)

Tabelle 8: Pseudocode Simulation mit Dynamikkorrektur

Für alle Fahrten

Für alle Zeitpunkte einer Fahrt:

Vorberechnung Zustandsdaten für den aktuellen Zeitschritt (mit konstanten elektrischen Wirkungsgraden bei der Bestimmung der Netto-Leistung vom/zum EDLC).
 Modifiziere die SOC-Grenzen in Abhängigkeit von der Position und Zustandsdaten.
 Bestimme den Betriebszustand des Motor-Generator-Satzes (P_{VKM}) in Abhängigkeit von den SOC-Grenzen.
 Bestimme Ein- und Ausgangsspannung des Hochsetz-Tiefsetz-Stellers BBC.
 Lese Drehzahl Motor-Generator-Satz, n_{VKM} aus der Matrix der verbrauchs-optimalen Punkte, abhängig von der Leistung und der Spannungsverhältnisse am Hochsetz-Tiefsetz-Steller.
 Bestimme den Verbrauch, bzw. die Emissionen für den VKM-Betriebspunkt.
 Lese Wirkungsgrade der elektrischen Maschinen aus Matrix.
 Berechne die Verluste EDLC.

Energiebilanz für den EDLC – Veränderung des SOC – Überprüfung $0 < SOC < 1$
 Addiere die Korrektur für den Verbrauch bzw. die Emissionen nach der EDLC-Bilanz vor und nach der Fahrt.

Für alle Zeitpunkte einer Fahrt:

Bestimme die Dynamikfaktoren als Funktion der Historie der Leistung und Drehzahl der VKM.
 Berechne die Dynamikkorrektur

Addiere die Dynamikkorrektur im Verbrauch bzw. der Emission.

Die von Leistungsverlauf P_{VKM} und Drehzahlverlauf n_{VKM} abhängigen resultierenden Faktoren für die Korrektur von Verbrauch und Emission wurden für die alle benutzten Fahrkurven und alle SOC-Varianten in Abhängigkeit der Drehzahl n_{VKM} und Last des Stromerzeugers P_{VKM} anhand Formel 20 berechnet.

Formel 20: Berechnung Dynamikkorrektur Kraftstoffbedarf pro Fahrt

$$m_{Kr} = b_e P_{VKM} + F_{trans} P_{Nenn VKM}$$

m_{Kr} Kraftstoffverbrauch pro Zeiteinheit

b_e spezifischer Kraftstoffverbrauch

P_{VKM} aktuelle Leistung VKM

$P_{Nenn VKM}$ Nennleistung VKM

F_{trans} normierte Korrektur Massenstrom transienter Betrieb

Negative Leistungen und damit verbundene Emissionen und Emissionskorrekturen treten in der Simulation des seriell-hybriden Antriebssystems nicht auf, da angenommen wird, dass während der Generator beim Auslaufen die VKM antreibt, die Kraftstoffzufuhr bereits abgeschaltet wurde. In Formel 21 werden die Formeln für die Korrekturen (bezogen auf die Nennleistung in kW) und in Abbildung 21 typische Ergebnisse der Berechnungen gezeigt:

Formel 21: Berechnung Dynamikkorrektur nach dem ARTEMIS Modell der TU-Graz Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (101)

$$\text{Mehr-/Minderverbrauch} = (26,238 \text{ Ampl}3P3s - 1,099 \text{ LW}3P3s - 4,965 \text{ Dyn}_{Ppos3s}) \frac{g}{h \text{ kW}}$$

$$\text{Mehr-/Minderemission}_{NO_x} = (0,167 \text{ Ampl}3P3s - 0,399 \text{ P40sABS} + 1,985 \text{ Dyn}_{Pneg3s}) \frac{g}{h \text{ kW}}$$

$$\text{Mehr-/Minderemission}_{HC} = (-0,080314 \text{ Ampl}3P3s + 0,001446 \text{ LW}3P3s + 0,04745 \text{ Dyn}_{Pneg3s}) \frac{g}{h \text{ kW}}$$

$$\text{Mehr-/Minderemission}_{CO} = (3,3 \text{ Ampl}3P3s + 0,387 \text{ P40sABS} - 0,0636 \text{ LW}3P3s) \frac{g}{h \text{ kW}}$$

$$\text{Mehr-/Minderemission}_{PM} = (0,144 \text{ Ampl}3P3s - 0,00706 \text{ LW}3P3s) \frac{g}{h \text{ kW}}$$

- LW3P3s* Zahl der Lastwechsel (> 3 %) über die vergangenen drei Sekunden
- Ampl3P3s* durchschnittliche absolute Amplituden der Lastwechsel über die vergangenen drei Sekunden
- P40sABS* Differenz der normalisierten Leistung zwischen aktueller und durchschnittlicher Leistung der letzten 40 Sekunden
- Dyn_Pneg3s* mittlere negative Leistung der vergangenen letzten drei Sekunden
- Dyn_Ppos3s* mittlere positive Leistung der vergangenen letzten drei Sekunden
- ABS_dn2s* absolute Änderung der normalisierten Drehzahl der vergangenen zwei Sekunden.

Die Mehr- oder Minderverbräuche und -emissionen aus Formel 21 werden mit der VKM-Nennleistung in kg / sec umgewandelt, damit sie in Formel 20 benutzt werden können.

Abbildung 21 zeigt beispielhaft einen Abschnitt aus der Simulation, mit dem Verlauf für die Motorleistung und die resultierenden Dynamik-Korrekturen für NO_x, PM und den Verbrauch über die Zeit.

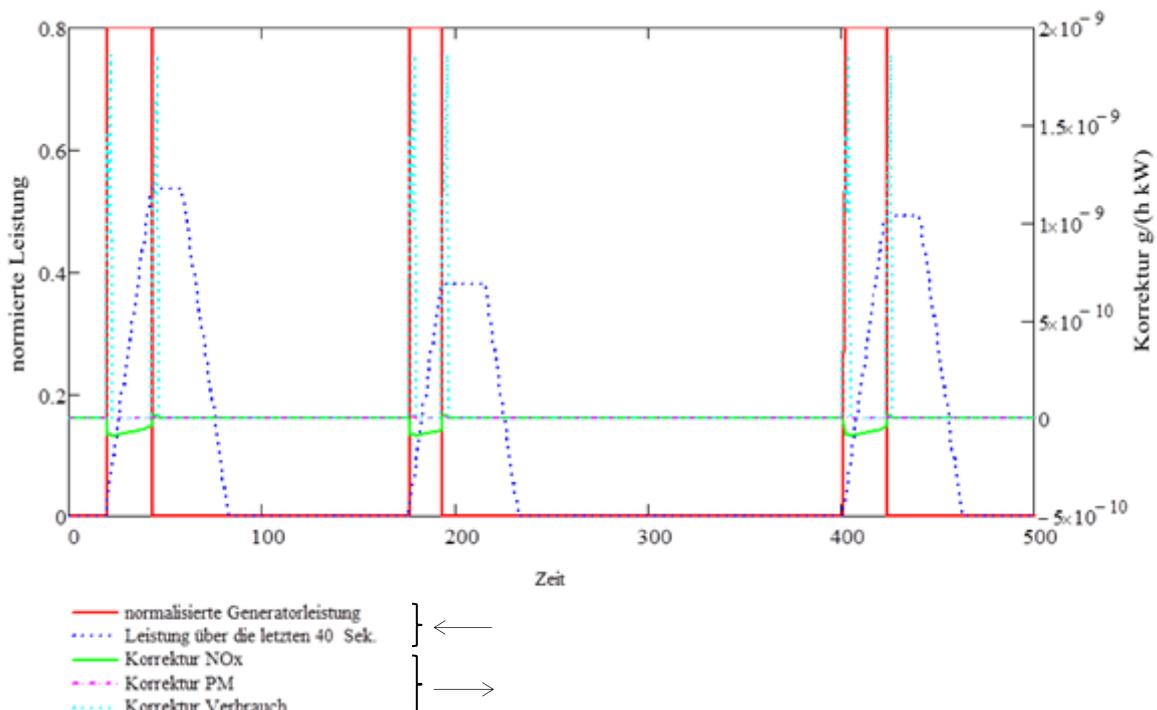


Abbildung 21: Ergebnisse der Dynamikkorrektur Motor-Generator-Satz gemäß Formel 21 aus (101)

Während die NO_x-Emission beim kurzzeitigen Betrieb des Motors absinkt, steigt der Verbrauch nach dem Start kurzfristig an (die Korrektur nach dem Stopp wird nicht gezählt). Die PM Emissionskorrektur ist auf diesem Maßstab nicht sichtbar. Der Stromerzeuger wird zwar aufgrund des Ein-Aus-Betriebes, und auch wegen der Modulation zwischen 60 % und 100 % der Leistung, dynamisch betrieben. Aufgrund der gemäßigten Rampen (max. 80 % Laständerung in einer Sekunde) und dem überwiegenden Einpunktbetrieb ergeben sich jedoch nur geringe Auswirkungen durch die Dynamik-Korrekturfaktoren.

6.4 ENERGIEBILANZ SERIELL-HYBRIDER ANTRIEB

Im folgenden Kapitel werden die Energieströme für den simulierten seriell-hybriden Antrieb beschrieben und für den Ausgangsfall mit konstanter Hysterese-Regelung (siehe Kap. 7.4) beispielhaft in einem Sankey-Diagramm dargestellt. Mit dieser Quantifizierung der Verluste wird es möglich für das taktische Energiemanagement operative Ziele in Bezug auf die Energieeinsparung zu definieren.

6.4.1 ENERGIESTRÖME

Vom Kraftstofftank fließt chemische Energie zur Verbrennungskraftmaschine. Die Energiemenge wird mit dem Heizwert (vormals unterer Heizwert) berechnet. Die Basis für die Ermittlung der Kraftstoffmenge ist der elektrische Energiebedarf des Antriebssystems, welcher inklusive der Verluste durch die Umwandlung und die Speicherung vom Generator gedeckt werden muss. Der spezifische Kraftstoffbedarf des Motor-Generator-Satzes wird abhängig von der Last bereits in der Optimierung der Drehzahl (und EDLC Spannung) vorberechnet, daher werden die elektrischen Verluste des Generators für die Analyse hier noch einmal separat ermittelt. Die Verluste in den Hochsetz-Tiefsetz-Stellern und in den elektrischen Maschinen werden als Differenz zwischen elektrischer und mechanischer Energie, vereinfacht als Wärmestrom dargestellt. Ebenso wird in Abbildung 22 die Differenz zwischen chemischer Energie und mechanischer Energie für die VKM als Wärmestrom dargestellt. Die Energiedifferenz im Energiespeicher zwischen Start und Ende der Simulation wird mit der durchschnittlichen VKM-Effizienz (spezifische Kraftstoffmenge pro Abtriebsenergie) in Kraftstoff umgerechnet.

An vom EDLC abströmenden Energiemengen gibt es neben der Energie für den Elektroantrieb noch die Verluste des EDLC. Hier werden zwei Arten in Abzug gebracht. Einerseits der Leckagestrom, der eine Art kontinuierlicher Abfluss darstellt, andererseits einen Verlust, der sich aus dem Innenwiderstand des EDLC ergibt, und der von den Stromstärken beim Laden und Entladen des EDLC abhängig ist (siehe Formel 19).

Der Startvorgang des Motor-Generator-Satzes kann, je nach Bauart, über den Generator erfolgen, der als Motor betrieben wird. Beim Starten der VKM mit dem Generator wird für das auf Drehzahl Bringen (träge Drehmasse) eine konstante elektrische Energiemenge beim EDLC in Abzug gebracht, wodurch sich die durch den Generator zu leistende Energiemenge erhöht. Diese Energiemenge bestimmt sich aus der Differenz zwischen Startenergie und nutzbarer Auslaufenergie, da beim Abstellen ein Teil der bei der (zumeist konstanten) Betriebs-Drehzahl gespeicherten Energie über den Hochsetz-Tiefsetz-Steller BBC in den EDLC transformiert werden kann. Die Energiemenge zum Elektromotor wird um Verluste in der elektrischen Maschine (inkl. Leistungselektronik sowie Hochsetz-Tiefsetz-Steller) verringert. Diese Verluste werden ebenfalls vereinfachend als Wärmestrom dargestellt, enthalten Stromwärme-, Ummagnetisierungs-, Stator-Zusatz- (Änderung der Ummagnetisierung) und Rotorverluste in

der elektrischen Maschine und Verluste in der Leistungselektronik. Dem Antrieb der Räder steht dann nach Abzug der Getriebeverluste die resultierende Energiemenge zur Verfügung.

Neben dem Motor-Generator-Satz wird dem EDLC auch über die Rekuperation Energie zugeführt. Ausgehend von der mechanischen Energie, die in der Antriebsmaschinen beim Bremsen wiedergewonnen werden kann und, verringert um die Verluste in Motor, Leistungselektronik und Hochsetz-/Tiefsetz-Steller, fließt Energie in den EDLC.

Abbildung 22 stellt die hier besprochenen Energieflüsse für den Ausgangsfall ohne taktisches Energiemanagement mit konstanter Hystereseregulierung des SOC (siehe Kap. 7.4) dar. Die Rekuperation im Antriebsmotor wird getrennt vom Antrieb selbst dargestellt, um die einzelnen Energieströme besser zeigen zu können. Die Teilverluste werden bei jeder Energieumwandlung zusammengefasst, auch wenn sie von verschiedenen Subkomponenten herrühren. Die Verluste der Spannungsanpassung werden ebenso getrennt ermittelt und dargestellt, auch wenn dies in der Praxis in der Leistungselektronik der elektrischen Maschinen selbst erfolgen kann. So lassen sich die Verluste insgesamt detaillierter darstellen. Der Rückfluss von Energie zum Tank steht für den Ausgleich der unterschiedlichen Energieinhalte im EDLC vor und nach der Fahrt.

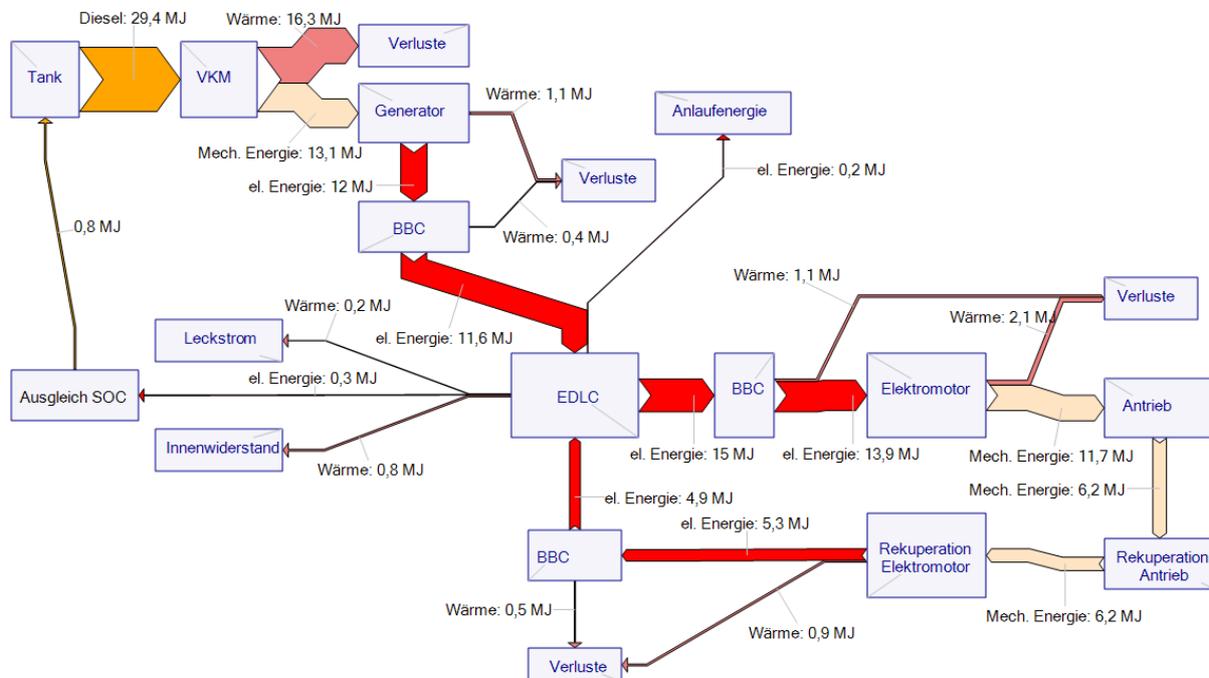


Abbildung 22: Sankey-Diagramm aus der Simulation des seriell-hybridelektrischen Antriebssystems⁶

6.4.2 QUANTIFIZIERUNG DER ENERGIEVERLUSTE

Aus dem Sankey-Diagramm in Abbildung 22 können für die Nullvariante mit konstanten Schaltgrenzen bei der Hystereseregulierung (siehe Kap. 7.4) folgende in Tabelle 9 dargestellten Verluste im seriell-hybriden Antrieb entnommen werden. Anzumerken ist, dass die Verluste auch Verluste für die rekuperierte Energie betreffen und daher, bezogen auf den durch die Rekuperation verringerten Kraftstoffeinsatz, hoch erscheinen.

⁶ aus der Simulation eines innerstädtischen Streckenabschnittes der Linie 67 Graz Richtung Augasse

Tabelle 9: typische Energieverluste in den Komponenten des seriell-hybriden Antriebssystems (vor der Korrektur infolge unterschiedlichen Energieinhalts vor und nach der Fahrt)

Verluste VKM	16,3 MJ
Verluste im elektrischen Strang	7,3 MJ
Elektromotor als Antrieb	2,1 MJ
Generator	1,1 MJ
Spannungsanpassung Antrieb (BBC)	1,1 MJ
Elektromotor bei Rekuperation	0,9 MJ
Innenwiderstand EDLC (Ohmsche Verluste)	0,8 MJ
Spannungsanpassung Rekuperation (BBC)	0,5 MJ
Spannungsanpassung Motor-Generator-Satz (BBC)	0,4 MJ
Anlaufenergie Motor-Generator-Satz	0,2 MJ
Leckagestrom EDLC	0,2 MJ
Summe Verluste insgesamt	23,6 MJ

Mit den Daten aus Tabelle 9 können die Einflussmöglichkeiten der Optimierung durch die taktische Regelung verstanden, und auf dieser Basis auch die Prioritäten bei der taktischen Optimierung im Betrieb festgelegt werden. Die größten Einzel-Verluste treten noch immer bei der VKM auf. Den größten Anteil bei den elektrischen Verlusten hat der **Elektromotor als Antrieb**. Bei den Spannungsanpassungen für Rekuperation und Generator sind die Verluste im Vergleich kleiner. Die Leckageverluste des EDLC sind noch geringer (kleiner ein Prozent der gesamten Verluste). Relevant ist jedoch der **Ohmsche Verlust** durch den Innenwiderstand des EDLC, wenn dieser geladen- oder entladen wird. Die Ohmschen Verluste im EDLC, sind hier viermal so hoch wie die Leckageverluste, die vom Quadrat der Spannung des EDLC abhängen.

Tabelle 10 zeigt die Energiebilanz, wie sie sich aus Abbildung 22 ergibt. Das Verhältnis Nutzenergie zu Endenergie ist mit ca. 40 % ist wesentlich besser, als beim nicht hybriden Antrieb. Mit Berücksichtigung der Gewinne durch die Rekuperation und der Bilanz für die Speicherinhalte ergibt sich ein Systemwirkungsgrad von ca. 34 %.

Tabelle 10: Bilanz des seriell-hybriden Antriebssystems

Brennstoffeinsatz	29,4 MJ
mechanisch rekuperierte Energie	6,2 MJ
Bilanzkorrektur SOC vor und nach der Fahrt	-0,8 MJ
Summe Aufwand	34,8 MJ
Nutzen: Summe mechanische Antriebsenergie	11,7 MJ

Die rekuperierte Energiemenge ist also im transienten Stadtverkehr hoch. Bezogen auf die mechanische Antriebsenergie beträgt die mechanisch rekuperierte Energiemenge ca. 53 %. Nach Verlusten beträgt die elektrisch rekuperierte Energiemenge, bezogen auf die elektrische Energie vom EDLC zum Antrieb noch ca. 33 %. Sie ist jedoch je nach Fahrkurve sehr unterschiedlich und schwankt um den Faktor 2, wobei bei Fahrkurven mit niedrigen Werten für die elektrisch rekuperierte Energiemenge auch die Summe der Antriebsenergie um 20 % geringer ist. Die **Anlaufenergie** für den Motor-Generator-Satz durch den Start-Stopp Betrieb ist hier im wiedergegebenen Fall nicht relevant, sehr wohl aber bei Varianten mit einer sehr viel höheren Anzahl von Starts.

7 ENTWICKLUNG EINES OPTIMIERUNGSANSATZES FÜR SERIELL-HYBRIDE ANTRIEBSSYSTEME

7.1 EINLEITUNG

Auf der Basis einer Beschreibung der Aufgabenstellung für das taktische Energiemanagement mit Optimierung des Einsatzes des Motor-Generator-Satzes, werden in diesem Kapitel Vorschläge für die Umsetzung in Algorithmen abgeleitet. Die Arbeitshypothese für das taktische Energiemanagement lautet damit, dass das eine reaktive Regelung des (taktenden) Betriebs des Motor-Generator-Satzes förderlich ist, ohne im Vorhinein berechnen zu können, ob die Taktik auch zum Erfolg führt. Mit Wissen über den aktuellen Betriebszustand des Motor-Generator-Satzes und die vorausliegende Strecke sollen sowohl der Kraftstoffbedarf, aber auch die damit korrelierten Emissionen bei seriell-hybriden Antriebssystemen reduziert werden.

Es wird die Simulationsumgebung beschrieben, mit der zwei unterschiedliche Ansätze für die taktische Optimierung des Betriebs des Motor-Generator-Satzes entwickelt werden, wobei auch eine Kombination der Ansätze möglich ist. Der optimale Betriebspunkt des Motor-Generator-Satzes soll jedoch deterministisch vorausberechnet werden. Die Definition der optimalen Betriebspunkte soll bereits während der Konfiguration des Antriebes erfolgen, also auch unabhängig von der Nutzlast bzw. den Umständen während der Fahrt gesehen werden.

7.2 OPTIMALER BETRIEBSPUNKT DER KOMBINATION VKM MIT GENERATOR

7.2.1 AUFGABENSTELLUNG

Im einfachsten Falle der Optimierung des Motor-Generator-Satzes kann wegen des sehr hohen Wirkungsgrades des Generators der Betriebspunkt durch Auswahl des **Betriebsoptimums der VKM** festgelegt werden, wenn am optimalen Lastpunkt der VKM auch ein Betrieb der elektrischen Maschine möglich ist. Bei Nutzung eines verbrauchsoptimalen Betriebspunktes im Kennfeld der VKM unterhalb der Vollast muss jedoch bei der Optimierung des Betriebspunktes ein Mehrgewicht der VKM angesetzt werden, da hierbei die Nennleistung der VKM bei festgehaltener Abtriebsleistung zum Generator höher sein muss. Dadurch verschiebt sich das Optimum wieder etwas zu höheren Lasten. Durch **Überlagerung der Wirkungsgradkurve** des Generators über das Kennfeld der VKM wird der mögliche Betriebsbereich des Motor-Generator-Satzes eingeschränkt⁷. Die Kennfelder der VKM und des gekoppelten Generators müssen also so überlagert werden, dass die verbrauchsgünstigen Betriebspunkte der VKM unter der Linie des maximalen Moments (bzw. Leistung) des Generators liegen. Damit können innerhalb dieses Bereiches die minimalen Verbräuche in g Kraftstoff pro kW_{el} für jeden Betriebspunkt gesucht werden. Die Berechnung der optimalen Betriebspunkte kann verfeinert werden, wenn zwei zusätzliche Freiheitsgrade berücksichtigt werden. Einerseits sind **unterschiedliche Nennleistungen** der gekoppelten Maschinen möglich, und andererseits kann ein dazwischen geschaltetes **Getriebe** berücksichtigt werden. Nach dieser Optimierung soll noch die Hypothese untersucht werden, ob der Wirkungsgrad des Hochsetz-Tiefsetz-Stellers bei variierender **Spannung** im EDLC zu anderen optimalen Drehzahlen führt, weil die erzeugte Spannung von der Drehzahl des Generators abhängt.

⁷ In der Praxis sorgt das Motormanagement dafür, dass die Betriebsgrenzen eingehalten werden.

7.2.2 ÜBERLAGERUNG DER VERBRAUCHSKURVEN VKM UND WIRKUNGSGRAD-KURVEN

Eine 1:1 Überlagerung der Verbrauchskurve der VKM und des elektrischen Wirkungsgrades des Generators stellt die einfachste Möglichkeit dar, schließt aber möglicherweise optimale Betriebsbereiche aus. Daneben ist es möglich die Matrix mit dem Wirkungsgrad vor der Überlagerung durch eine Variation der Übersetzung eines Getriebes zwischen den Maschinen und unterschiedliche Nennleistungen der beiden Maschinen zweidimensional zu strecken. Bei unterschiedlichen Nennleistungen kann ggf., obwohl dabei im optimalen Betriebspunkt eine Maschine in Teillast arbeitet, eine höhere Gesamteffizienz erzielt werden, weil durch die Streckung der Wirkungsgradkurve Einschränkungen durch den Betriebsbereich wegfallen und ein neues Minimum zulassen. Abbildung 23 zeigt eine 1 : 1 Überlagerung links und ein Beispiel für die besprochene Streckung der Effizienzmatrix des Generators in zwei Dimensionen rechts:

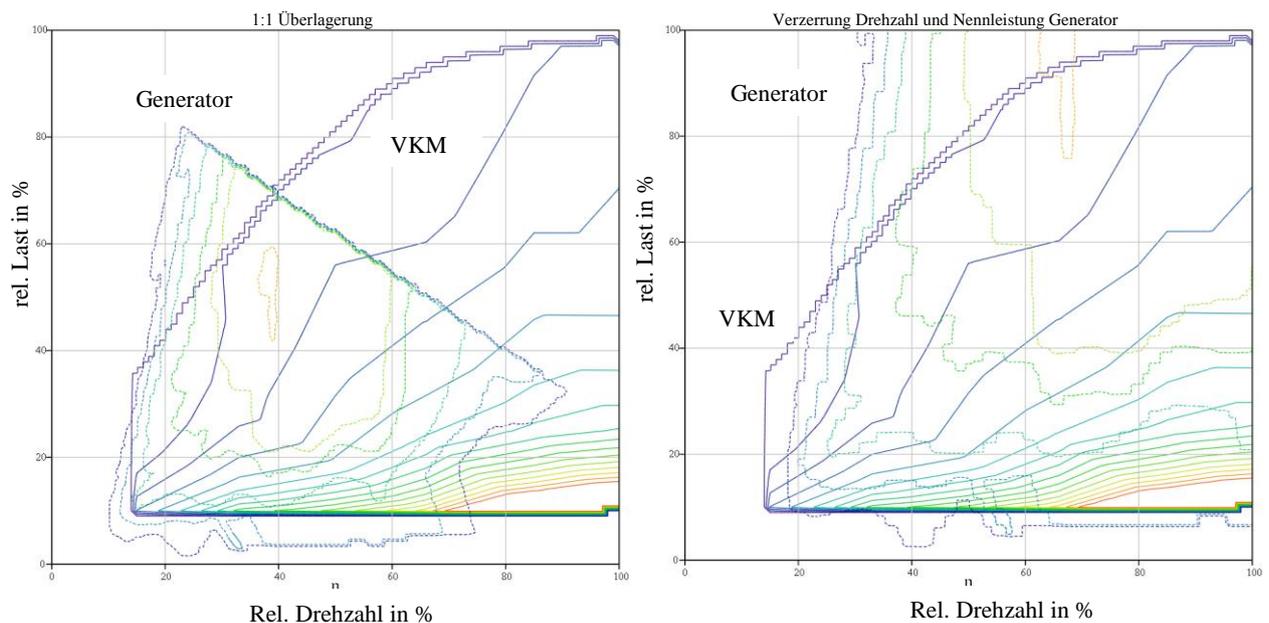


Abbildung 23: Überlagerungsvarianten von Verbrauchskurven VKM und Effizienzkurven Generator

Durch eine in zwei Dimensionen unterschiedliche Streckung der Matrix mit den Wirkungsgraden des Generators (strichlierte Linien in Abbildung 23) kann das Optimum des elektrischen Wirkungsgrades zielgerichtet in den Bereich einer höheren Last der VKM verschoben werden, wo geringere Kraftstoffverbräuche erzielt werden. Die (thermische) Betriebsgrenze des Generators befindet sich in der linken Abbildung dann außerhalb des Betriebsbereiches der VKM, welche damit uneingeschränkt für die Optimierung zur Verfügung steht. Da die Betriebsgrenze für den Generator faktisch von der Einsatzdauer bzw. Betriebsart abhängt, müsste der Optimierung bei Nutzung eines überlasteten Generators eine thermische Analyse folgen. Wird der spezifische Verbrauch bei einer 1 : 1 Überlagerung der Kennfelder von VKM und Generator betrachtet, ergibt sich folgender Verbrauch des Motor-Generator-Satzes in Abbildung 24:

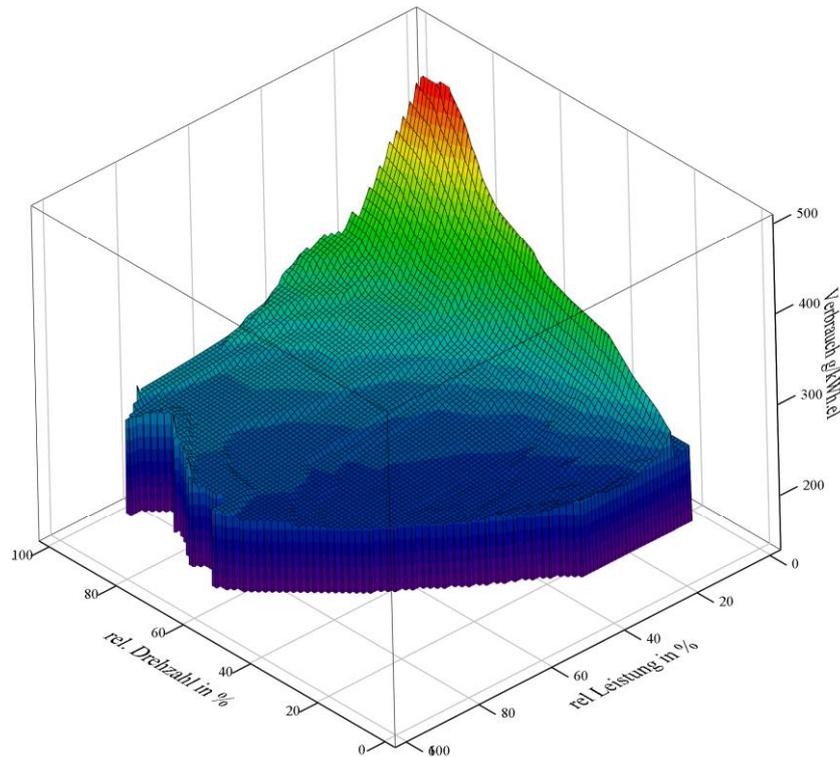


Abbildung 24: Verbrauch bei 1:1 Überlagerung der Verbrauchskurve der VKM mit der Wirkungsgradkurve des Generators

Die Lage des Verbrauchsminimums in der Nähe der unteren Betriebsgrenze der VKM zeigt in Abbildung 24 die Einschränkungen durch die Leistungs-Grenzkurve mit der maximalen thermischen Belastung des Generators und durch die Grenzkurve für die von der Leistung bzw. dem Drehmoment abhängige Minimaldrehzahl der VKM.

7.2.3 BERÜCKSICHTIGUNG VON PÖNALEN FÜR MASSE UND GETRIEBEVERLUSTE

Durch eine unterschiedliche Nennleistung von VKM und Generator, sowie durch eine Kopplung der Maschinen über **Getriebe**, entstehen zusätzliche Verluste. Durch die von der Masse der Maschinen und des Getriebes abhängigen Fahrwiderstände ist es nicht mehr möglich nur die Effizienzkurven zu überlagern, sondern es ist auch die **Abhängigkeit des Verbrauchs von der Fahrzeugmasse** bei der Bestimmung der Effizienzmaxima zu berücksichtigen. Bei der Bestimmung des optimalen Lastpunktes der VKM wird die Masse der VKM bei unterschiedlicher Ausnutzung der Nennleistung im verbrauchsoptimalen Punkt variieren, die Nennleistung des Generator-Satzes muss dabei festgehalten werden. Für die Korrektur der Ausnutzung der Nennleistung der VKM wird das Leistungsgewicht der VKM verwendet. Die relative Drehzahl des Generators bestimmt sich mit einem ins Langsamere übersetzten Getriebe wie in Formel 22 gezeigt:

Formel 22: Berechnung relative Generatorordrehzahl mit Getriebe

$$n_{relGen} = \frac{n_{VKM}}{i_{Getr} n_{NennGen}}$$

n_{relGen} relative Drehzahl Generator
 $n_{NennGen}$ Nenndrehzahl Generator
 i_{Getr} Getriebeübersetzung

Die folgende Tabelle 11 zeigt die Konsequenzen der Variation der Abstimmung von VKM und Generator auf das Optimum. Die Auslegung der Leistungselektronik-Controllers und des Hochsetz-Tiefsetz-Stellers werden hier nicht mit einbezogen. Es kann angenommen werden, dass die Veränderung der Nennleistung zwar auch die Masse der Elektronik ändert, aber dies das Gesamtgewicht des Antriebes nur sehr gering beeinflusst. Die Leistungselektronik der elektrischen Maschinen ist auch direkt mit der elektrischen Maschine gemessen worden (169) (170) und daher in der Dimensionierung fix mit dieser gekoppelt.

Tabelle 11: Einflusstabelle Optimierungsvarianten Abstimmung VKM und Generator

Variation	Umsetzung	Auswirkung
höhere relative Drehzahl Generator zu VKM	Generator hat durch Aufwärts-Übersetzung eine höhere Drehzahl als VKM	Masse Generator niedriger, da Maximalleistung bei höherer Drehzahl des Generators abgefragt wird. zusätzlicher Verlust durch Getriebe, zusätzliche Masse durch Getriebe
kleinere relative Leistung VKM zu Generator	Generator ist überdimensioniert, höhere Nennleistung als VKM	Masse Generator höher, da höhere Nennleistung als durch VKM erforderlich wäre
Lastpunktverschiebung VKM von Voll- zu Teillast	Verbrauchs-optimaler Teillastbetrieb der VKM	Masse VKM höher, da Nennleistung des Motor-Generator-Satzes bei Teillast der VKM abgefragt wird und die VKM daher eine höhere Nennleistung als der Generator hat.

Als Grundlage für die **Bestimmung** des Masseinflusses auf den Verbrauch wurde der Energiebedarf für die Überwindung der Fahrwiderstände mit der Fahrzeugmasse korreliert. Der Einfluss des, durch das Getriebe erhöhten Trägheitsmomentes wurde vernachlässigt. Dabei wurden wieder die neun auf Messwerten beruhenden Fahrkurven (siehe Kap. 8.2) mit variierenden Fahrzeugmassen durchgerechnet. Das Ergebnis zeigt, bedingt durch die geringen Luftwiderstände, mit einer Korrelation von ca. 0,94 einen beinahe linearen Zusammenhang zwischen Antriebsenergiebedarf und Gesamtmasse. Dies kann dadurch erklärt werden, dass der Anteil des Luftwiderstandes am Gesamtwiderstand mit zunehmender Masse abnimmt. Es kann daher für die Optimierung vereinfachend von einem proportionalen Einfluss der Massen der Maschinen auf den Gesamtverbrauch während der gesamten Fahrt ausgegangen werden, wie in Formel 23 definiert:

Formel 23: Formel Verbrauchskorrektur durch Annahme von Proportionalität der Summe der Massen zum Verbrauch

$$b_e \approx K (M_{VKM} + M_{Gen} + M_{Getr} + M_{Fahrzeug})$$

b_e spezifischer Verbrauch z. B. in g Kraftstoff pro kWh

K Konstante (z. B. in g Kraftstoff pro kWh und kg Gesamtmasse Fahrzeug)

M_{VKM} Masse VKM $M_{VKM} = m_{spez_{VKM}} P_{VKM\ nenn}$

M_{Gen} Masse Generator $M_{Gen} = m_{spez_{Gen}} P_{Gen\ nenn}$

$M_{Fahrzeug}$ Gesamtmasse Fahrzeug

Werden nun die Massen der Maschinen über die Masse-Leistungsverhältnisse und die Auslegungsparameter wie die Nennleistung berechnet, ergibt sich folgende Formel 24 für den korrigierten spezifischen Verbrauch:

Formel 24: Korrekturfaktor für den Verbrauch in Abhängigkeit von der Masse der Maschinen und des Getriebes

$$b_{e\ korr} = \frac{b_e}{\eta_{el}\eta_{Getr}} \left[\frac{(fm_{VKM}m_{spezVKM} + fm_{Gen}m_{spezGen}\eta_{el}\eta_{Getr})P_{VKM\ nenn} + m_{Fahrz} + m_{Getr}}{(m_{spezVKM} + m_{spezGen}\eta_{el}\eta_{Getr})P_{VKM\ nenn} + m_{Fahrz}} \right]$$

b_e Verbrauch VKM
 η_{el} elektrischer Wirkungsgrad
 η_{Getr} Wirkungsgrad des Getriebes zwischen VKM und Generator
 $m_{spezVKM}, m_{spezGen}$ Masse-zu-Nennleistungs-Verhältnis der Maschinen
 fm_{VKM}, fm_{Gen} Masseverhältnis der Maschinen im Bezug zur Referenzauslegung
 $P_{VKM\ nenn}$ Nennleistung VKM

Für die Abhängigkeit der Masse des Generators von der Nenndrehzahl, wird in der Optimierung des Betriebspunktes des Motor-Generator-Satzes der statistische Zusammenhang (Kurvenanpassung) aus Abbildung 25 genutzt, der aus Herstellerangaben von Elektromotoren im kleineren kW Bereich abgeleitet wurde. Die Korrektur für die Drehzahl wird dimensionslos, also mit dem Verhältniswerten für die spezifischen Massen bei unterschiedlichen Drehzahlen, berechnet.

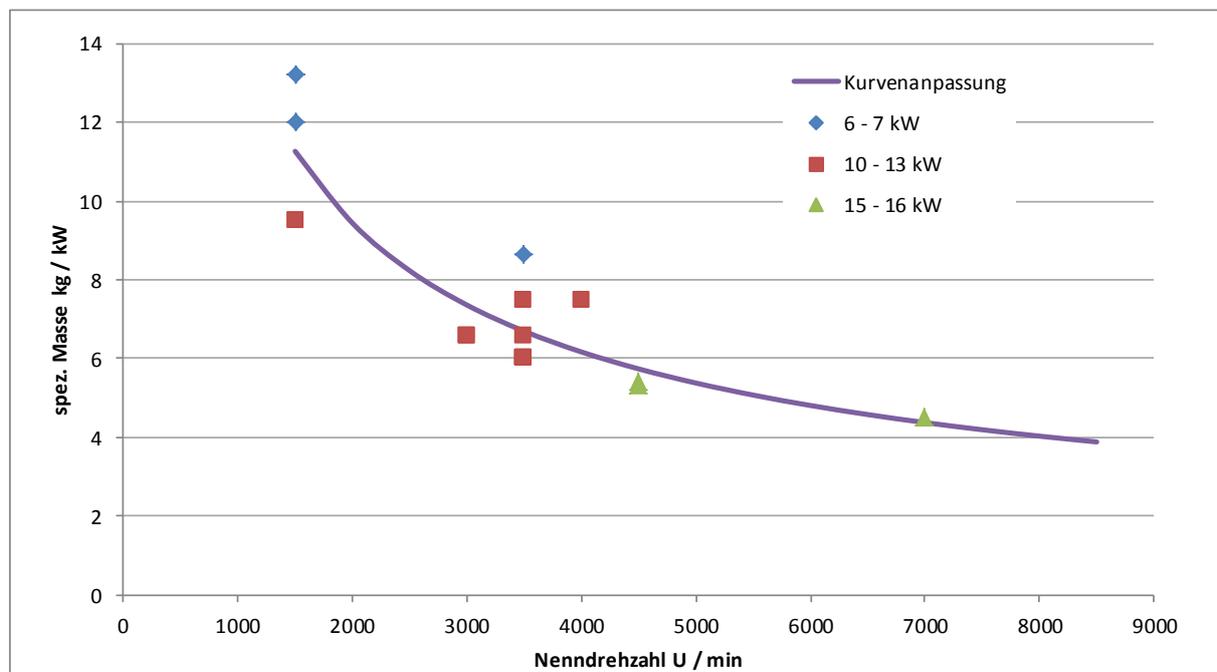


Abbildung 25: Masse-Leistungs-Verhältnis stationäre Elektromotoren, dargestellt über die Nenndrehzahl (186)

Das Masseverhältnis fm_{Gen} gibt in Formel 24 die Masse des Motor-Generator-Satzes im Verhältnis zum Fall der direkten Kopplung der Maschinen und Gleichheit der Nennleistungen an. Dabei wurden zur Berechnung des Masseverhältnisses der Maschinen die Masse-Leistungs-Verhältnisse aus Tabelle 6 genutzt.

Abbildung 26 zeigt die Auswirkung der Veränderung der Drehzahl des Generators, sowie der Nennleistung im Verhältnis zur VKM auf das relative Masse-Leistungs-Verhältnis des Generators und die Auswirkungen der Veränderung des Lastpunktes der VKM auf das relative Masse-zu-Leistungs-Verhältnis der VKM, also die Veränderung der relativen Masse pro Leistung.

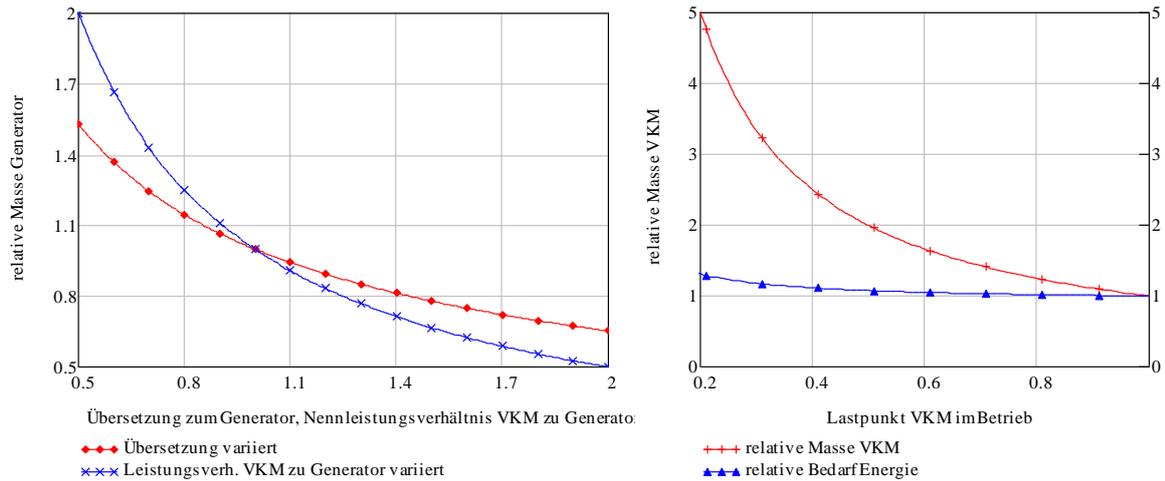


Abbildung 26: Veränderungen der Generatormasse durch Getriebe (Zerrung der Drehzahl) und Variation des Leistungsverhältnisse zwischen VKM und Generator nach Formel 24

Bei kleinerer Leistung des Generators im Vergleich zur VKM nimmt auch dessen Masse ab. Die in Abbildung 26 nicht eingezeichnete, weil von zwei Parametern abhängige, untere Grenze für die Leistung des Generators bestimmt sich über die erforderliche mittlere Leistung für die Einspeisung während der Fahrt, wobei diese mittlere Leistung aus Formel 5 abgeleitet wird.

Der Getriebewirkungsgrad, ebenso wie die Getriebemasse ist, wie in Abbildung 27 gezeigt, von der Übersetzung abhängig, wobei Werte für beide Übersetzungsrichtungen als gleich angenommen wurden. Es wird davon ausgegangen, dass bei einem Übersetzungsverhältnis von 1 keine Verluste durch Reibung in Verbindungselementen oder zusätzlichen Lagern zwischen VKM und Generator auftreten.

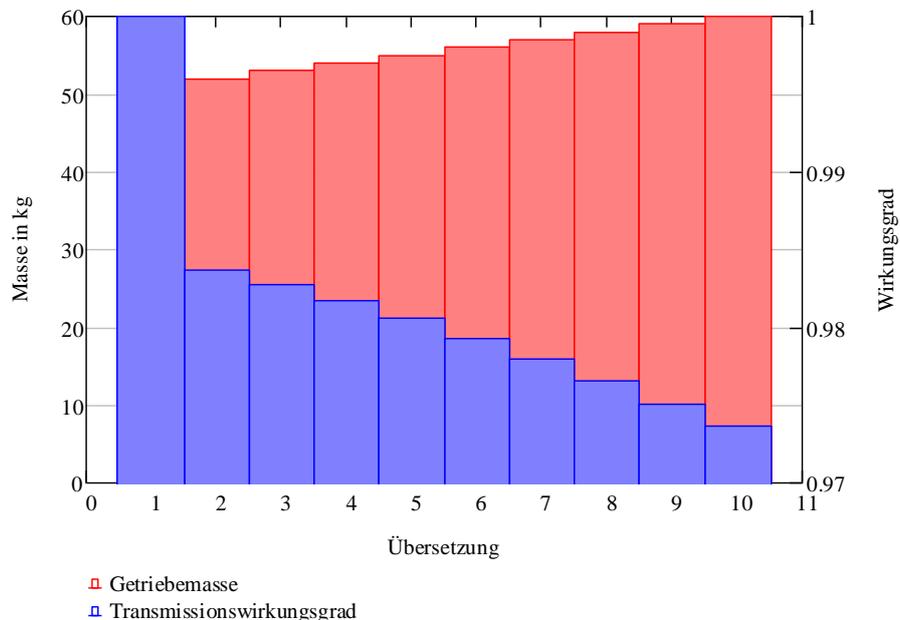


Abbildung 27: Annahmen Getriebemasse und Transmissionswirkungsgrad, abhängig von der Übersetzung (187)

Durch den Ansatz nach Formel 24, der den Getriebewirkungsgrad, sowie die zusätzliche Masse des Getriebes berücksichtigt, falls keine direkte Verbindung von VKM und Generator besteht,

wird das bei unterschiedlichen Drehzahlen erforderliche Getriebe pönalisiert. Damit wird sich die verbrauchsoptimale Konfiguration bei einem Übersetzungsverhältnis von 1, in Abbildung 28 als 100 % Drehzahlverhältnis Generator zu VKM dargestellt, einstellen:

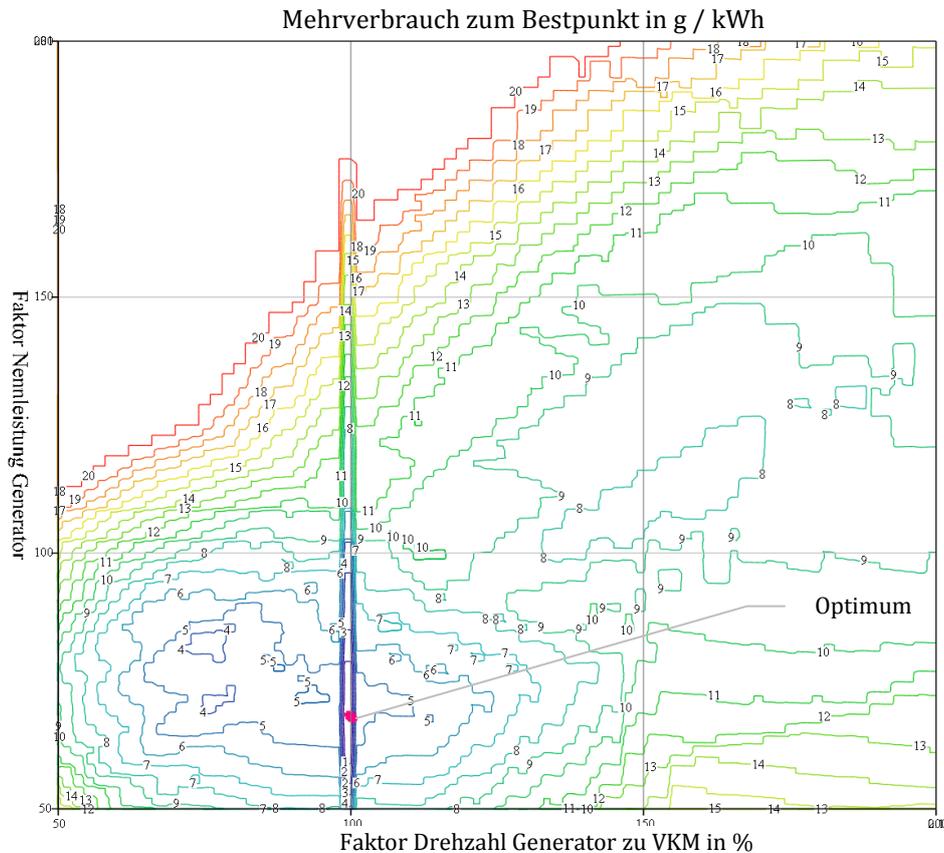


Abbildung 28: Mehrverbrauch des Motor-Generator-Satzes zum Bestpunkt in g / kWh bei Variation des Drehzahl und Nennleistungs- Verhältnisses zwischen VKM und Generator mit Pönalisierung des Getriebes

Das auf der zweiten Achse in Abbildung 28 doch deutlich unter 100 % befindliche Optimum für das Nennleistungsverhältnis VKM zu Generator (siehe Abbildung 26) führt zu höheren Kosten für den Generator und damit den Motor-Generator-Satz.

7.2.4 *SUCHE DES LASTABHÄNGIGEN OPTIMUMS*

Nach der Optimierung der Auslegung der Maschinen, sind das Nennleistungsverhältnis der Maschinen und die Übersetzung zwischen VKM und Generator definiert. Bei einem Getriebe mit fester Kopplung der Drehzahlen der Maschinen, ist nur mehr die Drehzahl für die Optimierung frei. Damit kann für jede Last des Motor-Generator-Satzes eine optimale Drehzahl ermittelt werden. Abbildung 29 zeigt das Ergebnis der Optimierung, wobei der Verbrauch auf den erzeugten Strom unmittelbar nach dem Generator, also vor dem Hochsetz-Tiefsetz-Steller bezogen wird.

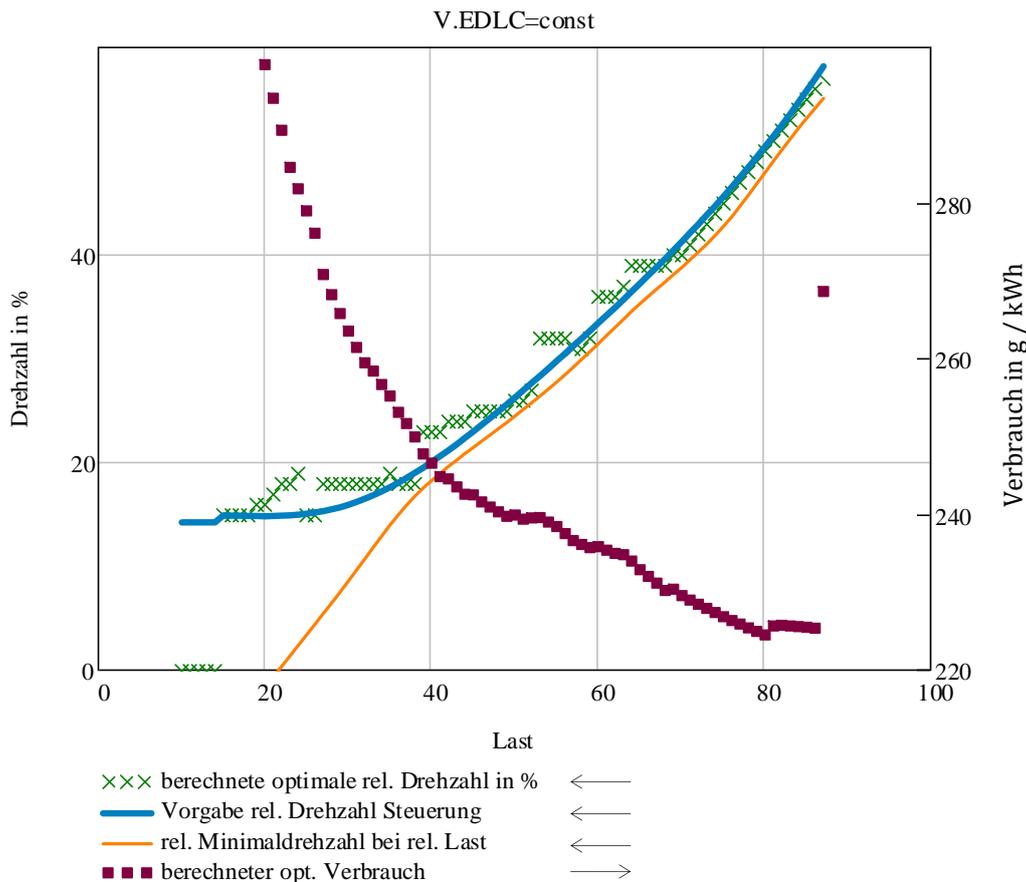


Abbildung 29: Optimale relative Drehzahl und Verbräuche pro im Generator erzeugter elektrischer kWh in Abhängigkeit von der Last in Prozent

Der spezifische Verbrauch des Motor-Generator-Satzes nimmt mit zunehmender Last ab, und gleichzeitig steigt die relative Drehzahl. Über ca. 80 % Last steigt der spezifische Verbrauch etwas, und es wird schnell die Betriebsgrenze des Motor-Generator-Satzes erreicht.

Bei einem Mehrpunktbetrieb des Motor-Generator-Satzes z. B. mit 80 % und 60 % der Leistung sind im Betrieb Rampen beim eventuellen Übergang zwischen den Lastpunkten zu fahren. Die optimalen Arbeitspunkte für die Lasten können aber unabhängig voneinander festgelegt werden, wenn die Dynamikeinflüsse bei flachen Rampen vernachlässigbar sind.

7.2.5 BERÜCKSICHTIGUNG DES SPANNUNGSEINFLUSSES FÜR EINE OPTIMIERUNG WÄHREND DES BETRIEBES

Wegen drehzahlabhängigen Generatorspannungen sind die **Verluste im Hochsetz-Tiefsetz-Steller** variabel, und es muss der Algorithmus für die Wahl des Betriebspunktes der VKM in der Simulation erweitert werden. Bei höheren EDLC-Spannungen könnten höhere Drehzahlen durch die dann geringeren Verluste bei der Spannungsanpassung zu niedrigeren Verbräuchen, bezogen auf die in den EDLC eingespeicherte elektrische Energie, führen. Zur Validierung dieser Hypothese wurde das Spannungsverhältnis EDLC zu Generator eingeführt und für jede Last die optimale Drehzahl ermittelt. Mit den Ergebnissen der Berechnung wird die Hypothese jedoch nicht bestätigt. Zu höheren Spannungen hin steigen die Drehzahlen, wie in Abbildung 30 ersichtlich, nicht merkbar an. Der Anstieg der Drehzahlen mit der elektrischen Leistung ist als einzige signifikante Auswirkung bei der Änderung der EDLC Spannung erkennbar.

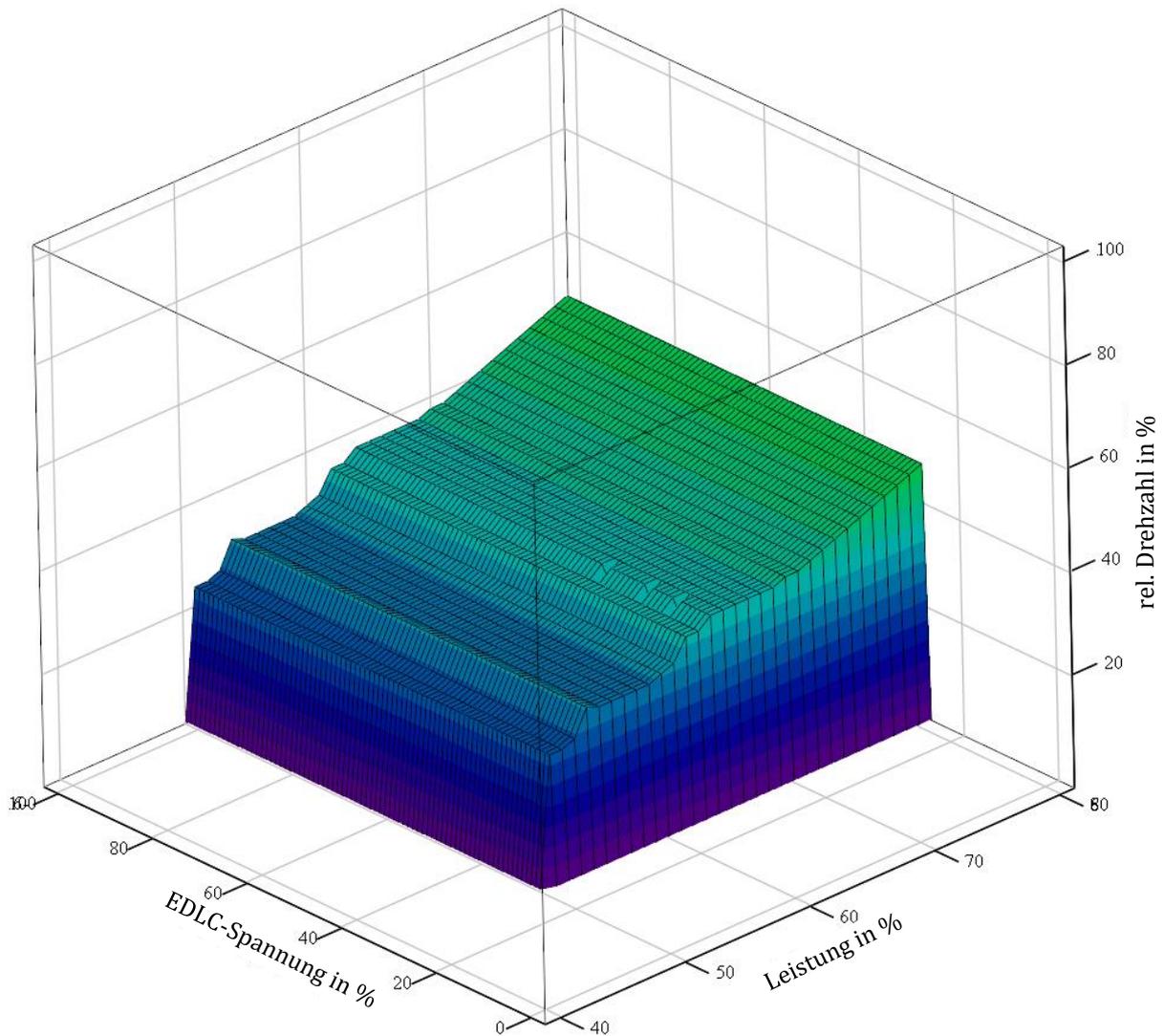


Abbildung 30: Optimale Drehzahl Motor-Generator-Satz in Abhängigkeit von elektrischer Leistung und EDLC-Spannung

Für die Berechnung zu Abbildung 30 wurde entsprechend der vorherigen Optimierung des Motor-Generator-Satzes ein Korrekturfaktor von 0,66 für die relative Leistung Generator zu Motor und damit eine 1,5-Fache Überdimensionierung der Nennleistung des Generators angenommen. Es ist beim auf die in den EDLC eingespeiste elektrische Energie bezogenen Verbrauch, der in Abbildung 31 gezeigt wird, nur ein sehr kleine Einfluss des, von den Spannungsverhältnissen abhängigen, Wirkungsgrades des Hochsetz-Tiefsetz-Stellers erkennbar.

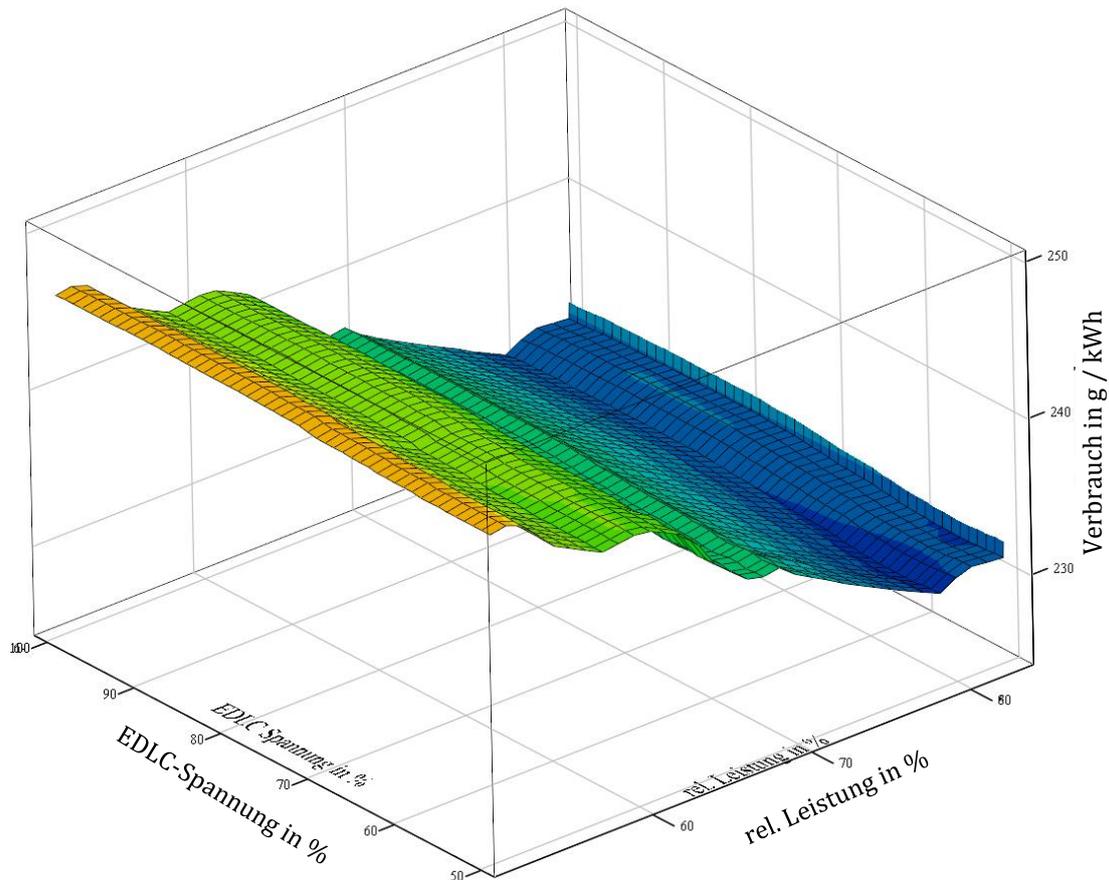


Abbildung 31: Spezifischer Verbrauch Motor-Generator-Satz in Abhängigkeit von EDLC-Spannung und elektrischer Leistung

Der minimale Verbrauch, bezogen auf den in den EDLC eingespeisten Strom, tritt in Abbildung 31, bei auf das Niveau des Generators abgesenkten EDLC-Spannungen und hohen VKM-Leistungen auf.

7.3 SIMULATIONSUMGEBUNG FÜR DIE OPTIMIERUNG DER HYSTERESEREGELUNG DES MOTOR-GENERATOR-SATZES

Nach der Optimierung der Betriebspunkte, kann das taktische Energiemanagement, d. h. der Einsatz des Motor-Generator-Satzes untersucht werden. Im folgenden Kapitel wird die Simulationsumgebung beschrieben, die benutzt wurde um die Algorithmen für das taktische Energiemanagement zu untersuchen.

7.3.1 SYSTEMARCHITEKTUR DER SIMULATION

Mit dem Ergebnis der Untersuchungen in Kap. 7.2 soll die Simulation im Hinblick auf die Wahl des Betriebspunktes des Motor-Generator-Satzes implementiert werden. Die in den verknüpften *Mathcad*-Programmen implementierte Systematik der Simulation wird in der folgenden Abbildung 32 dargestellt. Die abgetrennten *Mathcad*-Programme für Block 1: „Vorbereitung der optimalen Drehzahl Motor-Generator-Satz“ und Block 2: „Vorbereitung der el. Wirkungsgrade des el. Antriebes“ sind von der Umsetzung der Steuerung des Motor-Generator-Satzes unabhängig und werden für alle Variationen nur einmal ausgeführt. Als Schnittstelle zwischen der Vorbereitung entsprechend Kap. 7.2.5 und der Simulation werden Matrizen mit den Wirkungsgraden von elektrischem Generator, Hochsetz- Tiefsetz-Steller und mit dem Verbrauch der VKM beim optimalen Betriebspunkt (als Funktion der EDLC-Spannung und der Last) in einzelnen Dateien abgelegt. Die Nutzung von 100 x 100 Matrizen ermöglicht dabei die Werte in der Simulation schnell abrufen zu können. Mit dieser Vermeidung von CPU-Last können viele Variationen für das taktische Energiemanagement in kürzerer Zeit gerechnet werden. Block 4: „Dynamikkorrektur“ könnte nach Festlegung des Einsatzes des Motor-Generator-Satzes in dem Block 3: „Simulation der Fahrten“ in einem nachfolgenden, abgetrennten Durchlauf stattfinden, wurde aber für die frühzeitige Ausscheidung von Varianten in das MC-Programm integriert. Damit können die umfangreichen zeitabhängigen Leistungsdaten der berechneten Variante verworfen und nur die Ergebnisse im Speicher behalten werden.

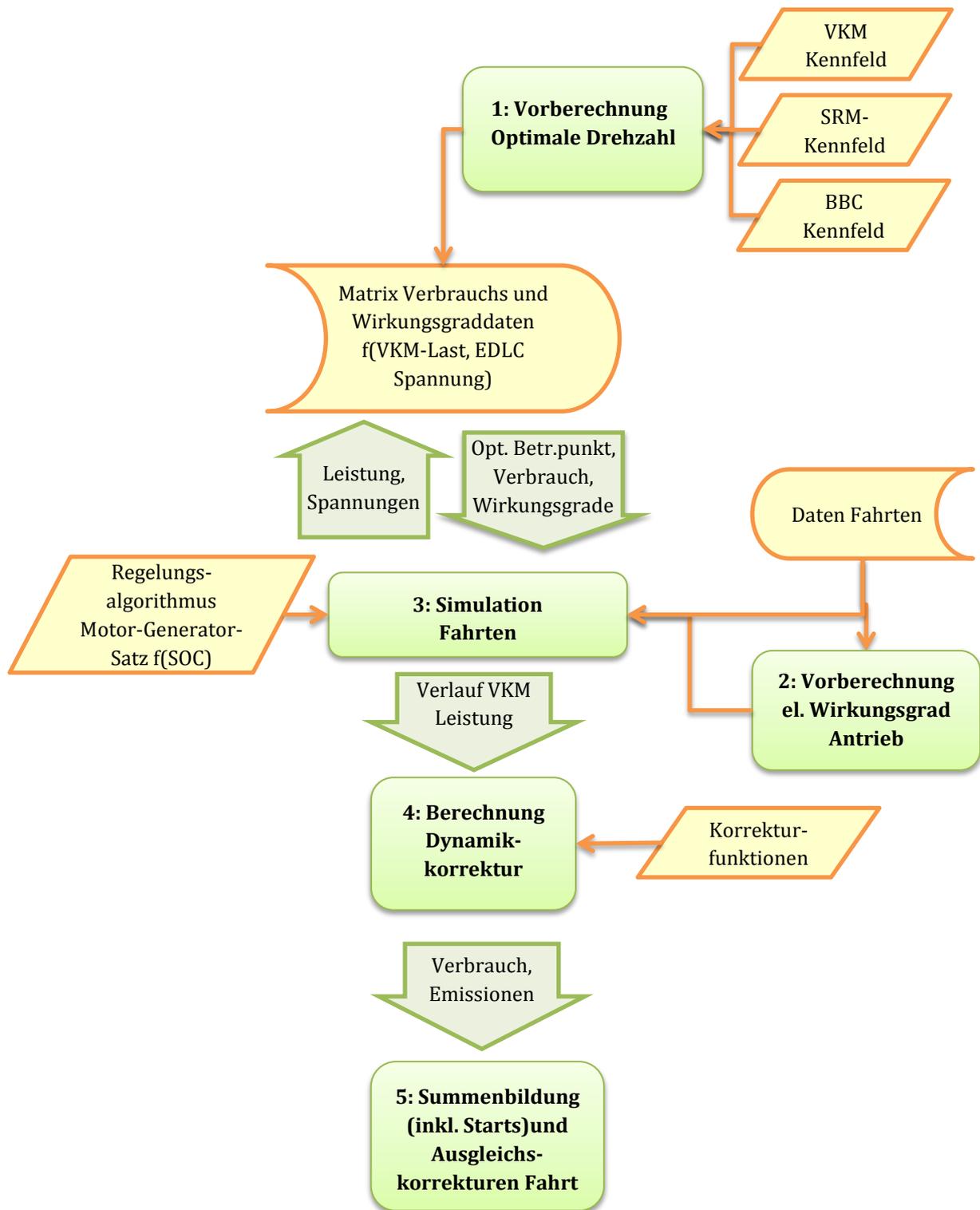


Abbildung 32: Berechnungsablauf Simulation - Datenflüsse und Datenspeicher

7.3.2 ABLAUF SIMULATION FAHRZEUGANTRIEB

Der Ablauf innerhalb von Block 3: „Simulation Fahrten“ aus Abbildung 32 wird in Tabelle 12 als Pseudocode genauer dargestellt:

Tabelle 12: Pseudocode des Ablaufes in der Simulation

- Berechne die Spannung der EDLC-Zelle aus dem SOC.
- Berechne den aktuellen EDLC-Leckagestrom abhängig von der EDLC-Spannung.
- Berechne die mechanische VKM-Leistung aus dem gewählten Zustand (ein/aus) und der gewählten Last.
- Berechne die elektrische Leistung, die vom Motor-Generator-Satz in den EDLC fließt, über den elektrischen Wirkungsgrad beim (optimalen) Betriebspunkt.
- Bestimme die elektrische Leistung, die vom Motor-Generator-Satz zum Hochsetz-Tiefsetz-Steller fließt, indirekt über den Wirkungsgrad des Hochsetz-Tiefsetz-Stellers. Dabei sind die Spannungsverhältnisse bereits bei der Bestimmung der optimalen Drehzahl eingeflossen und es werden dort bereits die Wirkungsgrade im Pfad vom Motor-Generator-Satz zum EDLC sowie die Drehzahl des Motor-Generator-Satzes festgelegt.
- Wenn die Antriebsleistung negativ ist:
 - Berechne die mechanische Rekuperationsleistung aus dem Minimum des Rechenwertes und der maximalen Leistung (120 % der Nennleistung).
 - Berechne die elektrische Leistung über den Wirkungsgrad des Elektroantriebs als Generator.
 - Berechne die elektrische Leistung zum EDLC über den Wirkungsgrad des Hochsetz-Tiefsetzstellers in Abhängigkeit der Spannungsverhältnisse EDLC-Antriebsmaschine
 - Berechne die Summe der Ströme zum EDLC.
 - Berechne die Ohmschen Verluste auf Basis der Ströme im EDLC.
 - Überprüfe ob $0 \% > SOC < 100 \%$
 - Wenn unter, oder überschritten: summiere Differenzbeträge
- Wenn die Antriebsleistung positiv ist:
 - Bestimme den Wirkungsgrad des Hochsetz-Tiefsetz-Stellers in Abhängigkeit vom Spannungsniveau.
 - Berechne die elektrische Leistung zum Elektromotor über den vorberechneten Motorwirkungsgrad.
 - Berechne den Strom aus dem EDLC zum Motor durch Division der mechanischen Antriebsleistung durch die beiden Wirkungsgrade.
 - Berechne die Summe der Ströme zum EDLC.
 - Berechne die Ohmschen Verluste auf Basis der Ströme im EDLC.
 - Überprüfe ob $0 \% > SOC < 100 \%$
 - Wenn unter, oder überschritten: summiere Differenzbeträge
- Erstelle die Bilanz der Zu- und Abflüsse zum EDLC und aktualisiere den Speicherinhalt
- Wenn der Motor-Generator-Satz gerade angesprungen ist:
 - Subtrahiere die netto-Summe der elektrischen Energie, die zum Start erforderlich ist.

Diese im Pseudocode beschriebene Logik wird für jeden **Zeitschritt**, also für jede Sekunde, einmal ausgeführt. Der diesem Block nachgeschaltete Punkt 5: „*Summenbildung (inkl. Starts) und Ausgleichs-korrekturen Fahrt*“ in Abbildung 32 berücksichtigt unterschiedliche Energieinhalte vor und nach der Fahrt im Energiespeicher. Es werden diese Unterschiede im Energieinhalt mit dem mittleren Kraftstoffbedarf während der Fahrt multipliziert. Es werden auch Verluste durch im Kreis geführte Energie berücksichtigt. Die geschieht über einen Ansatz wo auf den Energieumsatz im EDLC bezogene mittlere Verluste berücksichtigt werden. Durch die Berücksichtigung möglicher zusätzliche Verluste bei Durchleitung der Energie durch den Speicher werden SOC-Differenzen zwischen Start und Ende des Fahrtzyklus pönalisiert. Diese spekulative Korrektur führt zu weniger extremen Varianten beim gefundenen Optimum, einem aus Validitätsüberlegungen erwünschten Effekt.

Für die Emissionen wird das gleiche nachgeschaltete Verfahren zur Berücksichtigung der Dynamikeffekte benutzt wie beim Verbrauch, daher steht in Formel 25 die Variable x für den Kraftstoff- oder Emissionsmassenstrom:

Formel 25: Berechnung der Korrekturen aufgrund der Energiedifferenz im EDLC

$$\Delta x = (W_{EDLC_0} - W_{EDLC_{end}} + \Delta W_{zus}) x_{mittel}$$

$$\Delta W_{zus} = (W_{EDLC_0} - W_{EDLC_{end}}) \frac{\sum W_{Verl\ EDLC}}{\sum W_{Umsatz\ EDLC}}$$

Δx	Korrektur für Verbrauch oder Emission (Massenstrom)
x_{mittel}	mittlerer Verbrauch oder mittlere Emission während der Fahrt, bezogen auf den Energieumsatz im EDLC (Massenstrom/Energie)
ΔW_{zus}	Korrektur für den vermiedenen Energieverlust des EDLC (Energie)
$\sum W_{Verl\ EDLC}$	Summe der Energieverluste im EDLC während der gesamten Fahrt (Energie)
$\sum W_{Umsatz\ EDLC}$	Summe des Energieumsatzes EDLC während der gesamten Fahrt (Energie)
W_{EDLC_0}	Energieinhalt EDLC am Beginn der Fahrt (Energie)
$W_{EDLC_{end}}$	Energieinhalt im EDLC am Ende der Fahrt (Energie)

Die so ermittelten Korrekturwerte wurden im Sankey-Diagramm Abbildung 22 in Kap. 6.4.1 kumuliert als symbolischer Energie-Rückfluss zum Tank dargestellt, da im vorgestellten Fall nach der Fahrt mehr Energie im Speicher vorhanden ist als vor dem Start.

7.4 OPTIMALE TAKTISCHE REGELUNG BEI SERIELL-HYBRIDEN ANTRIEBEN

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen für die Implementierung des Telematik-gestützten taktischen Energiemanagements im Rahmen der in Kap. 7.3 vorgestellten Simulationsumgebung erarbeitet.

7.4.1 ANFORDERUNGEN TAKTISCHE OPTIMIERUNG

Ausgangslage für die taktische Regelung:

Beim seriell-hybriden Antrieb kann die Gewährleistung der Fahrbarkeit der Regelung des Elektroantriebs überantwortet werden. Hier wird ausschließlich die übergeordnete taktische Regelung der Energieversorgung des Energiespeichers, also das Einsatzschema des Stromerzeugers (im Englischen als *Fuel Converter* bezeichnet), behandelt. Die Regelung des als Stromerzeuger genutzten Motor-Generator-Satzes muss jedoch dennoch dafür sorgen, dass die vorgegebenen Fahrkurven ohne Einschränkungen absolviert werden können. Das taktische Energiemanagement wird dieser Aufgabe überlagert. Es sind dabei zwei grundsätzlich unterschiedliche Arten der Regelung des Motor-Generator-Satzes möglich:

- Hysterese-Regelung (On-Off-Regelung)
- Lastfolgeregelung (siehe auch 11.2.4).

Die **Hysterese-Regelung** (On-Off Regelung) schaltet den Stromerzeuger immer dann ein, wenn ein bestimmter unterer Ladezustand (SOC) unterschritten wird und aus, wenn ein bestimmter oberer Ladezustand erreicht wurde. Durch einen entsprechenden großen Abstand zwischen den schaltenden SOC-Grenzen wird ein ständiges Ein- und Ausschalten des Stromerzeugers vermieden. Der Stromerzeuger arbeitet dabei hauptsächlich in einem Betriebspunkt, der vorher so festgelegt wurde, dass ein minimaler spezifischer Verbrauch, bezogen auf die erzeugte Strommenge erzielt wird.

Der Lastpunkt des Motor-Generator-Satzes berücksichtigt in der Simulation aber auch die Energiebilanz und wird in der Simulation aus zwei Stufen ausgewählt:

1. Im Normalfall wird nach Unterschreiten des unteren SOC der Betriebspunkt bei 80 % Last gewählt (Verbrauchsoptimum).
2. Wird eine mittlere Grenze des SOC erreicht, so startet der Motor-Generator-Satz mit einer Teillast von 60 %, um einen verbrauchsungünstigen Betrieb mit Volllast nach Punkt 2. zu vermeiden, wenn der Energieinhalt im EDLC zu Null zu gehen droht.

Eine Dritte Stufe, die einen Betrieb bei Volllast vorgesehen hätte, falls der Energieinhalt des EDLC bei Unterschreiten des unteren SOC, trotz Einspeisung (beim optimalen Lastpunkt des Motor-Generator-Satzes) dennoch zur Neige geht, wurde verworfen.

Die **Lastfolgeregelung** (Power oder Load Follower) hingegen bildet den groben Verlauf der Fahrwiderstände über die Zeit in der Leistung des Stromerzeugers nach. Die Lastfolgeregelung benutzt aber den Speicher, um den Stromerzeuger kurzfristig vom Antriebsbedarf zu entkoppeln und Bremsenergie aufnehmen zu können. Nachdem beim seriell-hybriden Antrieb der SOC proportional zum Integral der entnommenen Leistung ist, kann eine Lastfolgeregelung auf Basis des SOC (188) statt einem Proportionalregler mit der Antriebsleistung, auch einen Integralregler nutzen. Bei Verwendung von EDLC existieren auch Lastfolgeregelungen, die die Spannung im EDLC in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit regeln, da die in den EDLC bei einem Bremsvorgang einspeicherbare Energiemenge proportional zur kinetischen Energie sein soll. Je höher die Geschwindigkeit, desto niedriger wird die Vorgabe für die Spannung gewählt, damit der EDLC die kinetische Energie beim elektrischen Bremsen aufnehmen kann (180).

Durch die Verwendung größerer Speicher wird eine Hystereseregulierung mit längeren Stillständen des Motor-Generator-Satzes eher möglich, wobei mit dem Betrieb des Stromerzeugers im Bestpunkt auch der Verbrauch sinkt, wenn das Abstellen und Anfahren des Stromerzeugers nicht zu viele Verluste erzeugt (siehe Kap. 11.2.4).

Spezielle Aufgabenstellung im Öffentlichen Personen Nahverkehr ÖPNV:

Für die Verwendung von Fahrzeugen auf einer bestimmten Strecke, und noch mehr bei vorgegebenen Fahrzeiten, wie im Linienbetrieb von Bussen im ÖPNV, sind vorab für die Optimierung mehr Daten bekannt als bei Pkw, die frei im Straßennetz und auch auf Autobahnen und Schnellstraßen fahren. Variiert jedoch die Beladung oder der Einsatzbereich im Betrieb, treten bei Bussen des ÖPNV bei den Fahrwiderständen erhebliche Änderungen auf. Ein taktisches Energiemanagement muss in der Lage sein auf die Änderung der Randbedingungen entsprechend zu reagieren, wenn diese ohne Änderungen zu einem höheren spezifischen Verbrauch führen würden.

Nach Aussagen der *Graz Linien* war beim Einsatz eines Hybridbusses mit parallel-hybridem Antrieb auf der Linie 39 (189) damit zu rechnen, dass die Fahrzeiten bei Kraftstoff-sparendem Fahren nicht eingehalten werden können. Als Grund wird geringe Leistungsaufnahme bei der Rekuperation angegeben. Dies zeigt auch, dass die vorhergehende Abstimmung des Antriebssystems an die Anforderungen wichtig ist. Das hier gewählte Verfahren der Nutzung gemessener Fahrkurven und des Verwerfens aller Lösungen, die diesen Fahrkurven nicht folgen können, kommt der Anforderung der Einhaltung der Fahrzeiten voll nach.

7.4.2 ZIELE FÜR DIE TAKTISCHE OPTIMIERUNG DES HYBRIDANTRIEBES

Im Folgenden werden drei Ziele für die taktische Optimierung und Hypothesen für die Zielerreichung vorgestellt.

1. Maximierung der rekuperierten Energie

Die vollständige Ausnutzung der Bremsenergie ist durch den hohen Energieeinsatz für die Beschleunigung im innerstädtischen Linienverkehr besonders wichtig. Dieses Ziel kann auch als Minimierung der verworfenen elektrischen Bremsleistung definiert werden. Dazu werden in

Tabelle 13 die allgemeinen Kriterien definiert. Mithilfe des taktischen Energiemanagements kann der Motor-Generator-Satz abgeschaltet werden, wenn der Ladestrom in den Energiespeicher durch eine gleichzeitige Rekuperation sehr hoch wird. Ebenso kann der SOC im Energiespeicher abgesenkt werden, wenn eine größere Rekuperation zu erwarten ist. Das Ziel der taktischen Optimierung ist aber bereits frühzeitig einzugreifen.

Tabelle 13: Kriterien für die Maximierung der rekuperierten Energie

Kriterium	Bemerkung	Lösung über
Ausreichende elektrische Leistung der Antriebsmaschine für die Erzeugung der Verzögerung	i. d. R. sind elektrische Maschinen kurzfristig hoch überlastbar.	Auslegung der elektrischen Maschinen
Vermeiden von Schlupf am System Reifen Fahrbahn bei der maximalen Verzögerung	Ein elektrisches ABS hilft Schlupf zu vermeiden, besonders bei Einzelantrieb pro Rad. Ggf. ist eine Verteilung auf zwei Antriebsachsen d. h. vier Räder sinnvoll.	Antriebssteuerung, zwei angetriebene Achsen speziell bei dreiachsigen Fahrzeugen
Keine Limitierung durch begrenzten Ladestrom des Energiespeichers	EDLC sind hier im Vorteil. Bei Sekundärbatterien entsteht dadurch eine Lebensdauerproblematik, wenn der zulässige Ladestrom überschritten wird.	Auslegung Energiespeichersystem, ggf. auch taktisches Energiemanagement
Keine Limitierung durch begrenzte Kapazität des Energiespeichers	Sekundärbatterien sind hier im Vorteil, bei EDLC steigen die Kosten und Volumina schnell bei höheren Kapazitäten.	Auslegung EDLC und taktisches Energiemanagement

2. Ziel Verringerung des Verbrauchs

Es handelt sich bei der Optimierung des Betriebs des Motor-Generator-Satzes im Verbund mit dem EDLC um ein komplexes Problem, und es können folgende Subziele formuliert werden:

- a) Verringerung der infolge einem zu kleinen Speicher bei der Rekuperation verworfenen Energie
- b) weniger Hochfahrvorgänge des Stromerzeugers und der damit verbundenen Verluste durch die Differenz zwischen Anfahrnergie und im Auslauf gewinnbare Energie.
- c) Verringerung der elektrischen Verluste beim Betrieb des Energiespeichers, in Kombination mit dem Stromerzeuger
- d) effizienterer Betrieb des Stromerzeugers durch Vermeidung von ineffizientem temporären Leistungsspitzen sowie eines Teillastbetriebs des Motor-Generator-Satzes

3. Ziel Verringerung der Emissionen

Falls Rampen beim Einsatz des Motor-Generator-Satzes im On-Off Betrieb erforderlich werden, sollen diese so gefahren werden, dass es zu keinem wesentlichen Anstieg der Emissionen über den optimalen stationären Betrieb hinaus kommt. Durch die Dynamikkorrektur nach Formel 21 ist dabei ein Ansatz vorhanden, der hilft die negativen Einflüsse zu erkennen und Mehremissionen zu vermeiden. Für die NO_x und die PM-Emission sind dabei die durchschnittlichen absolute Amplituden der Lastwechsel über die vergangenen drei Sekunden wesentlich, für die HC-Emission die Zahl der Lastwechsel (mit einer Laständerung > 3 %) über die vergangenen drei Sekunden.

Weitere Möglichkeiten der Verringerung der Emissionen liegen bei der Ausgestaltung der nachgeschalteten Abgasreinigung, die auf den intermittierenden Betrieb der VKM im On-Off Betrieb Rücksicht nimmt. Diese Auslegung kann und muss unabhängig von einer eventuellen taktischen Regelung des Motor-Generator-Satzes erfolgen, um alle Eventualfälle abdecken zu können (siehe auch Kap. 12.4).

7.5 WECHSELWIRKUNGEN BEI DER DIMENSIONIERUNG DES SERIELL-HYBRIDEN ANTRIEBSSYSTEMS

7.5.1 ÜBERBLICK EINFLÜSSE

EDLC sind hauptsächlich geeignet um große Leistungen für eine kurze Dauer abzugeben, es fallen jedoch, bezogen auf die speicherbare Energie, hohe Kosten und auch ein hohes umbautes Volumen an. Zusammen mit der notwendigen Befestigung und Kühlung der Kondensatoren entsteht ein Mehrgewicht, bei Anordnung der EDLC am Dach auch eine größere Anströmfläche. Beides führt zu einem größeren Antriebsbedarf. Verringert man nun die Größe des Energiespeichers, um dieser Problematik zu begegnen, so wird es vorkommen, dass dieser die rekuperierte Bremsenergie nicht mehr vollständig aufnehmen kann. Grund ist, dass er bei höheren Ladezuständen betrieben werden muss, um ein Anfahren und Mithalten im Verkehr zu gewährleisten. Der Motor-Generator-Satz (Genset) könnte bei der Auslegung der Nennleistung auf einen Wert unterhalb der Dimensionierung eines dieselelektrischen Antriebes, die erforderliche Leistung für den Antrieb nicht aufbringen.

Abbildung 33 zeigt die Zusammenhänge mit dem Einfluss auf den Verbrauch bei der Auslegung eines seriell-hybriden Antriebs in einer halbqualitativen Form, wobei die Strichstärken die vermutete Höhe der Einflüsse wiedergeben. Des Weiteren ist das Vorzeichen des Einflusses eingetragen. Der Einfluss des Betriebspunktes der VKM steht für die Last und Drehzahl mit der diese betrieben wird:

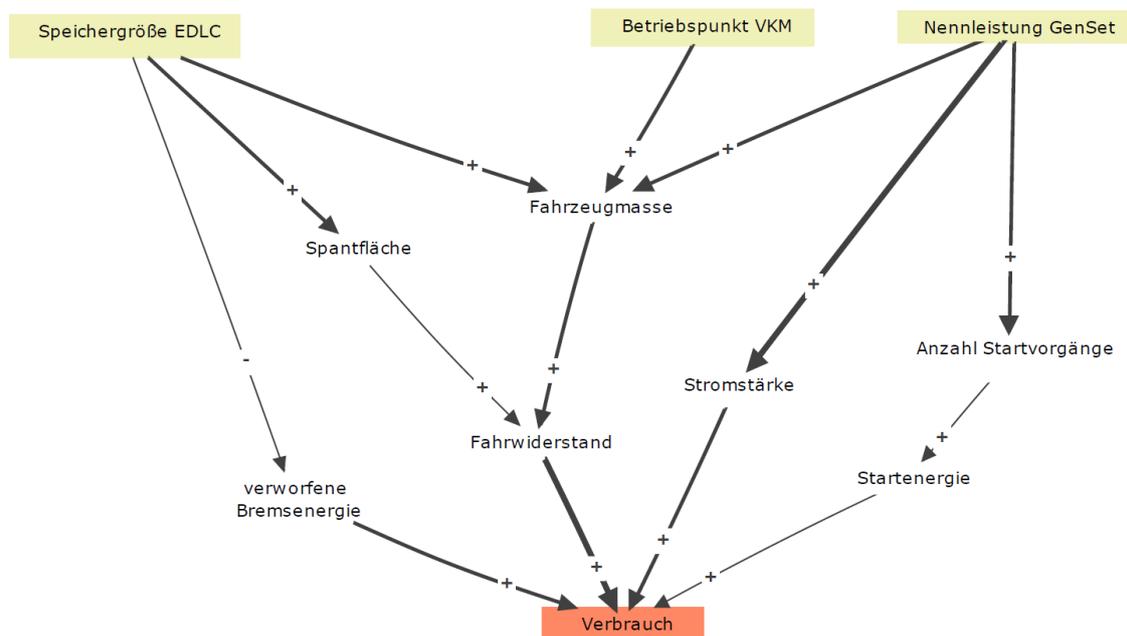


Abbildung 33: Wechselwirkung der Speichergröße und Auslegungsdaten Motor-Generator-Satz auf Verbrauch (Consideo-Modeller)

Aus den Angaben für diese graphische Darstellung können die Aktivsummen der Einflüsse auf den Verbrauch (190) bestimmt werden. Von den drei Basiseinflüssen haben die **Nennleistung des Motor-Generator-Satzes** und die **Speichergröße** d. h. der Energieinhalt des EDLC die größten Auswirkungen auf den Verbrauch. Aus dieser Reihung kann jedoch nicht auf den absoluten Einfluss auf den Verbrauch geschlossen werden und es sind nichtlineare Effekte zu erwarten, weswegen in der Folge eine Variation der Auslegungsparameter Nennleistung und Speicherinhalt durchgeführt wird.

7.5.2 EINFLUSS NENNLEISTUNG MOTOR-GENERATOR-SATZ

Bei einem On-Off Betrieb des Motor-Generator-Satzes (Hysteres-Regelung), verbrauchen mehr Anfahrvorgänge auch mehr Startenergie. Diese kann beim Abstellen über den Generator nicht vollständig zurückgewonnen werden (siehe Formel 9). Die Ströme zum/vom EDLC und die davon quadratisch abhängigen elektrischen Verluste sind im Mittel höher, wenn eine höhere Betriebsleistung des Motor-Generatorsatzes gewählt wird. Bei einem schnelleren Nachladen steigt auch die Spannung im EDLC schneller, und damit über die höhere Spannung die Leckageverluste des EDLC. Diese Zusammenhänge werden hier durch die Variation der Nennleistung des Motor-Generator-Satzes untersucht. Abbildung 34 zeigt die Ergebnisse der Variation der Nennleistung des Motor-Generator-Satzes. Dabei wurde bei der Analyse die Lastpunkte des Motor-Generator-Satzes in Prozent der Nennleistung, ebenso wie die Wirkungsgrade bzw. spezifischen Verbräuche, für alle Varianten festgehalten und eine nicht durch ein taktisches Energiemanagement beeinflusste Hysteresregelung benutzt:

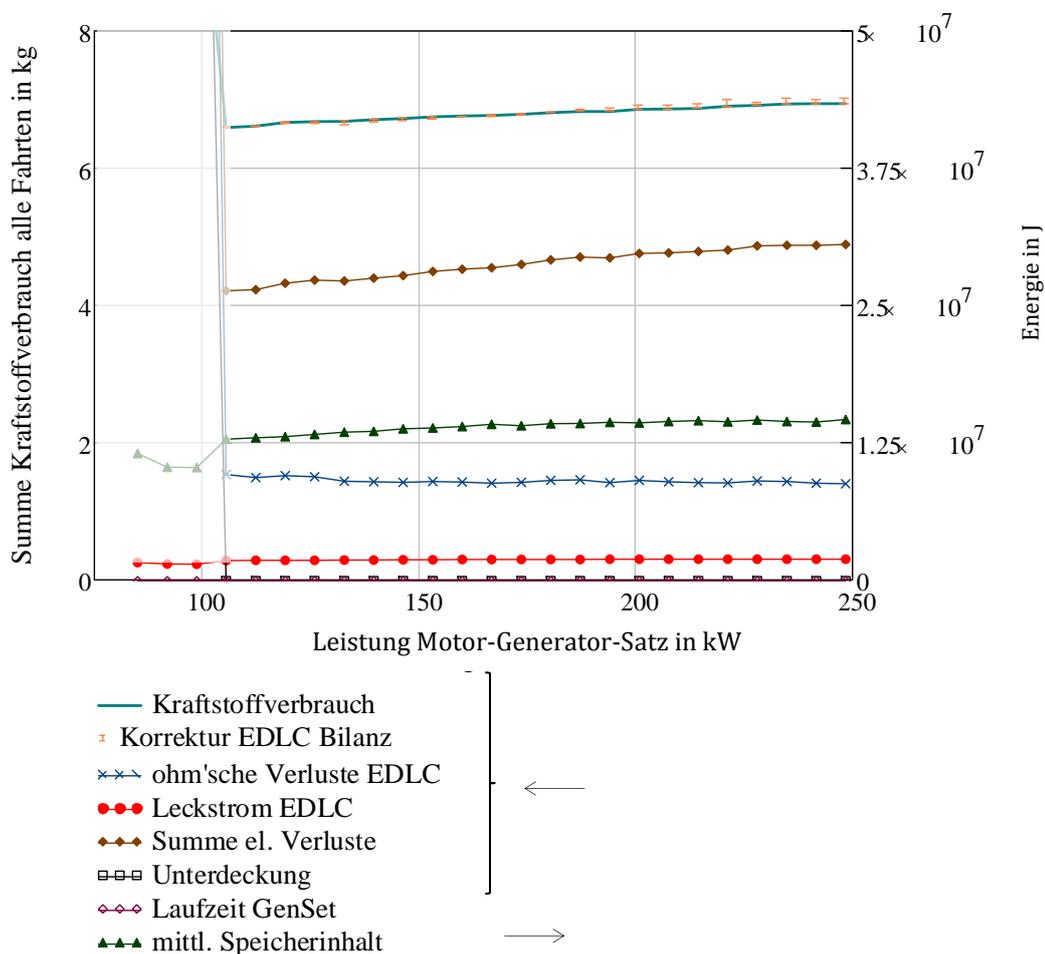


Abbildung 34: Auswirkungen der Variation der Nennleistung des Motor-Generator-Satzes

Der Verbrauch sinkt leicht mit abnehmender Nennleistung des Motor-Generator-Satzes, bis zu dem Punkt bei ca. 107 kW, wo die Nennleistung des Motor-Generator-Satzes für eine Erfüllung der Fahrkurven zu gering wird und eine Unterdeckung bei der im EDLC erforderlichen Energie auftritt (siehe Formel 7) und daher links davon keine gültigen Ergebnisse vorliegen. Die Ohm'schen Verluste nehmen allerdings mit abnehmender Leistung des Motor-Generator-Satzes (Gen-set) geringfügig zu, die Summe der elektrischen Verluste jedoch ab, womit sich die höhere Gesamteffizienz erklären lässt.

Eine größere Anzahl von Starts des Motor-Generator-Satzes hat über den Anlaufverlust einen geringen negativen Einfluss auf den Verbrauch. Bei der Verringerung der Leistung des Motor-Generator-Satzes nimmt die Laufzeit des Motor-Generator-Satzes (GenSet) zu, wie die Abbildung 35 zeigt. Die Zahl der Starts steigt mit abnehmender Leistung des Motor-Generator-Satzes, und ohne weitere Optimierung des Motor-Generator-Satz-Einsatzes, aber nur leicht von 66 auf 73.

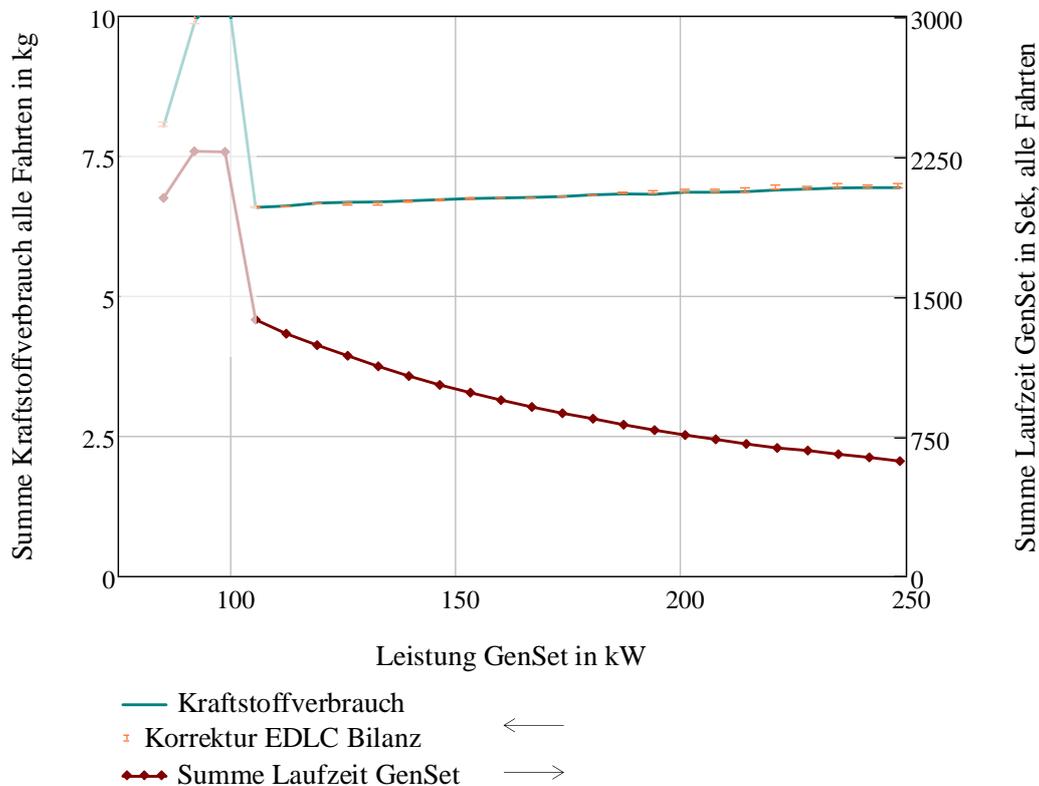


Abbildung 35: Kraftstoffverbrauch und Laufzeit abhängig von der Leistung des Motor-Generator-Satzes

Bei höherer Leistung des Motor-Generator-Satzes (GenSet) muss dieser in Summe kürzer betrieben werden. Negativ für den Kraftstoffverbrauch sind dabei höhere Ströme d. h. Ohmsche Verluste und mehr Energieaufwand für Anfahrvorgänge.

7.5.3 EINFLUSS SPEICHERINHALT EDLC

Durch die hohen Kosten von **elektrochemischen Doppelschichtkondensatoren EDLC**, die hier als Energiespeicher eingesetzt werden, ist ein wichtiges Ziel die Verringerung der Größe des EDLC. Dieses Ziel kann ebenso durch die taktische Regelung im Betrieb unterstützt werden, indem die Regelung versucht den Energieinhalt im Betrieb bestmöglich produktiv zu nutzen. Abbildung 36 zeigt die Konsequenzen einer Veränderung des durch den EDLC für die Hystereseregulierung maximal bereit gestellten Energieinhaltes, jedoch ohne Optimierung der Hystereseregulierung beim Einsatz des Motor-Generator-Satzes:

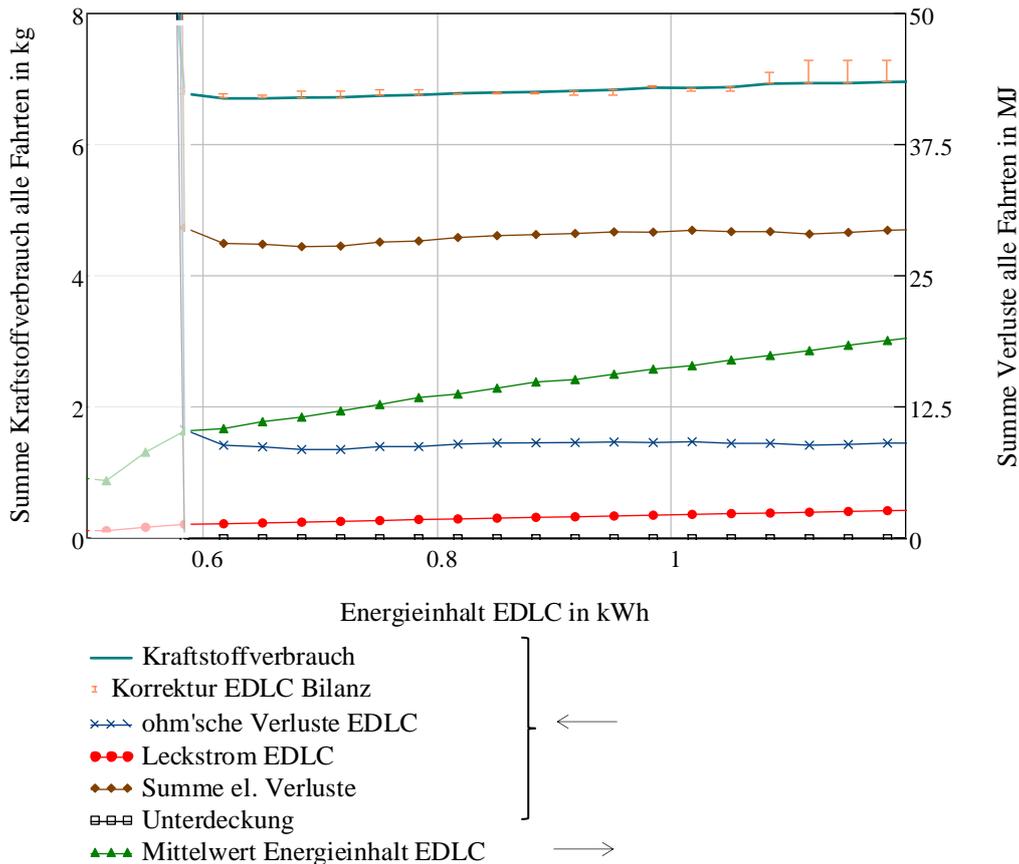


Abbildung 36: Konsequenzen der Veränderung des Energieinhaltes des Energiespeichers (konstante Schaltgrenzen der Hystereseregulung)

Abbildung 36 zeigt, dass der Kraftstoffverbrauch mit abnehmender EDLC Speichergröße bis zu einem Minimum sinkt. Bei Unterschreitung eines Wertes bei ca. 0,63 kWh steigt er jedoch aufgrund einer stark zunehmenden Summe der elektrischen Verluste wieder an, wobei die Kurve bei Speichergrößen von 0,7 kWh sehr flach verläuft. Der fallende EDLC-Energieinhalt verringert über die geringere mittlere EDLC-Spannung geringfügig die elektrische Verlustleistung durch den Leckagestrom der EDLC. Die, infolge der steigenden Spannung, zunehmenden Ströme vergrößern jedoch die Ohmschen Verluste während des Energieumsatzes. Bei sehr großem Energieinhalt steigt die Wahrscheinlichkeit, dass eine große Energiedifferenz zwischen Beginn und Ende der Fahrt auftritt, da dessen Vermeidung nur indirekt in die Regelung mit aufgenommen wurde (siehe Kap. 7.3.2). Bei einem zu kleinen Energieinhalt des EDLC kann abhängig von der VKM-Leistung die Hystereseregulung nicht vermeiden, dass eine Unterdeckung des Energiebedarfs für den Antrieb auftritt. Die Ergebnisse der Berechnung werden hier unter einem Energieinhalt für den EDLC von ca. 0,59 kWh ungültig.

Die folgende Abbildung 37 zeigt die Zahl der Starts des Motor-Generator-Satzes in Abhängigkeit vom relativen Energieinhalt der EDLC. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass eine Energiedifferenz im EDLC zwischen Start und Ende der Fahrt die Zahl der Starts beeinflusst. Bei größeren Speichern kommt es bei der Simulation zu weniger Startvorgängen des Motor-Generator-Satzes und es kann vorkommen, dass sich die Summe der Laufzeit verkürzt. Die Ursache ist aber nur statistisch und daher nach der Vornahme der Korrektur über die Energiedifferenz im EDLC zwischen Start und Ende der Fahrt nur von geringem Einfluss.

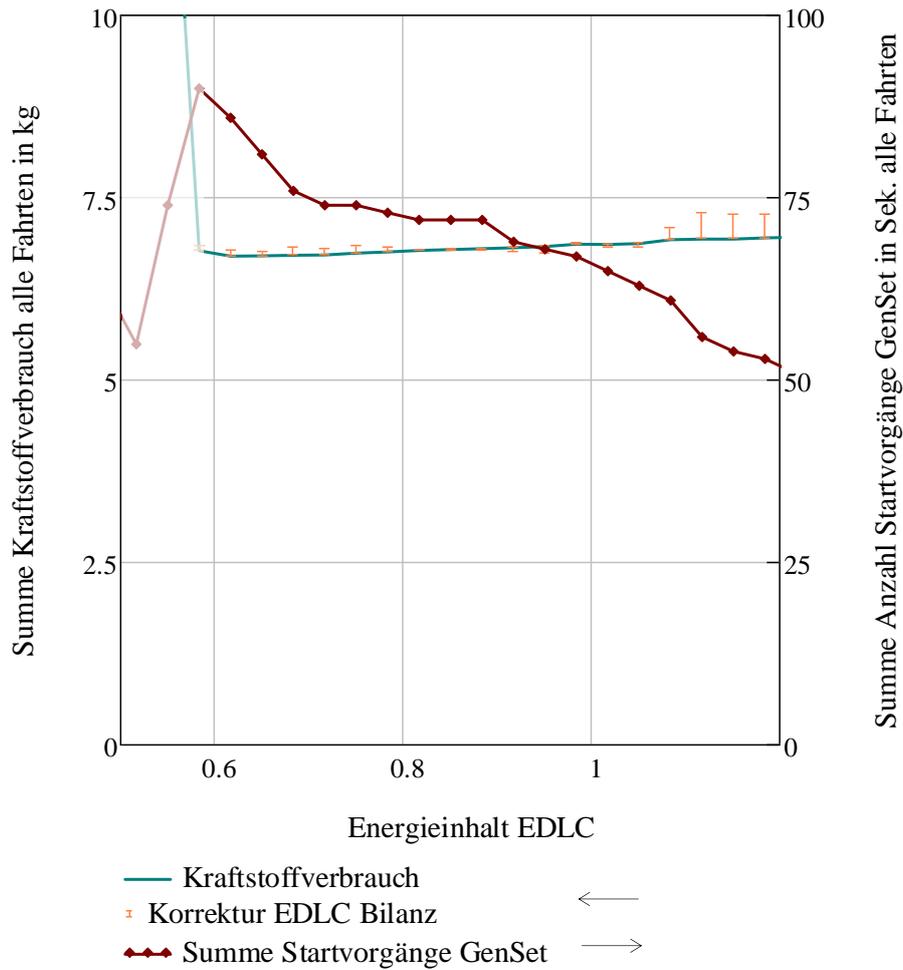


Abbildung 37: Kraftstoffverbrauch und Anzahl Starts Motor-Generator-Satz abhängig vom normierten Energieinhalt des EDLC

Mit niedrigeren Energieinhalten des EDLC sinkt der Verbrauch leicht, wobei ab Unterschreitung einer unteren Grenze die Verluste u. a. durch eine höhere Zahl von Startvorhängen ansteigen. Bei einem darunter stattfindenden stetigeren Betrieb des Motor-Generator-Satzes, müsste dieser mit Teillast betrieben werden, wodurch der Kraftstoffbedarf zunimmt.

8 MÖGLICHKEITEN DER DATENGEWINNUNG FÜR DAS TAKTISCHE ENERGIEMANAGEMENT

8.1 EINLEITUNG

Für die Bestimmung der optimalen Parameter für das taktische Energiemanagement in der *Monte-Carlo-Variation* (siehe Formel 29 ff. und Kap. 14.1) sind geographische zeitabhängige Daten aus dem Betrieb der Busse erforderlich. Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie diese Daten für die Simulation gewonnen wurden und bei einer zukünftigen Umsetzung des Verfahrens für das taktische Energiemanagement in der Praxis gewonnen werden könnten.

8.2 ERMITTLUNG DER FAHRKURVEN FÜR DIE SIMULATION

Vor Beginn der Erstellung der Simulation wurden GPS-Rohdaten im Intervall von einer Sekunde mittels Laptop aufgezeichnet. Die Messung fand longitudinal in Busmitte am straßenmittigen Fenster statt und nutzte einen mehrkanaligen GPS-Empfänger (BT338 *SiRFstar III*). Diese GPS Rohdaten nach NMEA-0183 (191) stellen Informationen über Position, Geschwindigkeit, Satelliten und Datenqualität in genormten Zeichenketten (Strings) dar. Tabelle 14 zeigt die verschiedenen Arten der GPS-Strings, wie sie vom GPS-Empfänger an den Laptop übertragen und von diesem aufgezeichnet wurden:

Tabelle 14: Beispiel Aufzeichnung GPS-Rohdatensätze (BT338 *SiRFstar III*)

```
$GPGSV,3,3,10,11,10,162,21,27,06,189,29*77
$GPRMC,172412.000,A,4703.6176,N,01525.9522,E,0.50,259.73,010306,,*02
$GPGGA,172413.000,4703.6176,N,01525.9524,E,1,09,1.0,366.1,M,43.8,M,,0000*54
$GPGSA,A,3,17,24,13,20,11,04,27,23,25,,,,,1.5,1.0,1.1*30
$GPRMC,172413.000,A,4703.6176,N,01525.9524,E,0.17,224.88,010306,,*08
```

Für die Simulation wurden die so aufgezeichneten \$GPRMC Strings ausgewertet, welche die Minimalinformation des GPS-Empfängers zusammenfassen (*Recommended Minimum Sentence* bestehend aus UTC-Zeit, Status der Bestimmung, Breitengrad, Längengrad, Geschwindigkeit in Knoten, Bewegungsrichtung, Datum, Missweisung). Des Weiteren wurden noch die \$GPGSA Strings genutzt, die die Genauigkeitsinformationen für das GPS beinhalten (Aktive Satelliten, Art der Positionsbestimmung, Nummer der Satelliten, Genauigkeit, horizontale-, vertikale Genauigkeit). Die Informationen über die Längen- und Breitengrad wurden für die weiteren Berechnungen aus der *Grad-Minuten* -Form mit Nachkommastellen (z. B. 4703.6176=47° 3,6176) umgewandelt. Auch die Zeit wurde aus einer *hh:mm:ss*-Form mit Nachkommastellen (z. B. 172412.000=17 h 24 Min. 12,000 Sek.) konvertiert.

Die Rohdaten mussten in einem ersten Schritt auf Ihre Eignung untersucht werden. Sprünge in der Fahrkurve, die durch schlechte Sichtbarkeit von Satelliten entstanden, machten einzelne Aufzeichnungen unbrauchbar. Verlegungen von Haltestellen, auch aufgrund von Bauarbeiten, erlauben es nicht die Stichprobe an Fahrten nachträglich mit neuen Messdaten zu erhöhen, da diese in Bezug auf die Haltepunkte nicht mehr vergleichbar sind. Für die Fahrkurven wurde aus den jede Sekunde vom Gerät ausgegebenen GPS Meldungen (\$GPRMC) die Geschwindigkeit (in Knoten) extrahiert, da die Ermittlung der Geschwindigkeit aus den Positionsdaten zu größeren Fehlern führt. Infolge der zweifachen Ableitung würde die Beschleunigung unrealistische Extrema durch die Sprünge bei den Koordinaten selbst bei stehendem Fahrzeug zeigen (192). Auch eine Anwendung von Kalman-Filtern ist hier nicht möglich, da zu wenige Messungen pro Zeiteinheit vorliegen und sich bei einer Filterung von GPS-Daten die nur im Sekundenintervall

aufgezeichnet wurden, die Fahrkurven unzulässig verschieben und/oder verflachen würden. Die aus den Geschwindigkeitswerten der gültigen GPS-Daten abgeleiteten **Fahrkurven wurden auf den zweidimensionalen Fahrweg projiziert**, um eine Referenz für die Telematik basierte Regelung zu ermöglichen. Die Berechnung der Abstände zur Erkundung, ob ein potentieller Zwangshalt erreicht wurde, erfolgte, wie in Formel 26 gezeigt, über das schneller zu berechnende und für die kleinen auftretenden Entfernungen hinreichend genauen Pythagoras Theorem, und nicht über die *haversine* Formel (205) oder den *Sphärischen Cosinus Satz* (193):
Formel 26: Abstandberechnung aus GPS-Koordinaten (207)

$$Abst = R_{Erde} \sqrt{(\Delta\phi)^2 + (\cos(\phi_m) \Delta\lambda)^2}$$

- R_{Erde} Erdradius
- Φ geographische Breite (Φ_m Mittelwert)
- λ geographische Länge

Bei den kleinen hier auftretenden Entfernungen zu den potentiellen Zwangshalten ist es ohne Genauigkeitsverlust möglich, statt dem Mittelwert für die geographische Breite einen der beiden Werte (Start- oder Endpunkt) für die geographische Breite einzusetzen. Abbildung 38 zeigt die aufgezeichneten GPS-Daten, und eine ausgewählte Fahrt, die die Kriterien für die Nutzung in der Simulation erfüllt, überlagert im Stadtplan.



Abbildung 38: GPS-Spur der aufgezeichneten Fahrten und Darstellung einer ausgewählten Fahrt in OpenStreetMap (194)

Die zu unterschiedliche Zeiten mittels GPS aufgezeichneten Fahrzeugpositionen, sind wegen dem Einfluss der aktuellen Satellitenkonstellation (Ephemeriden), sowie infolge von Mehrwegeeffekten beim GPS-Empfang (195) nicht deckungsgleich. Bei Stillstand des Empfängers ist aber auch in Abbildung 38 zu sehen, dass es zufällige Abweichungen in alle Richtungen gibt, die GPS-Koordinaten „springen“.

Für die Erstellung von Fahrkurven für die Simulation wurden die Geschwindigkeiten auf den Weg bezogen. Durch die Nutzung der Rohdaten konnte die *Static Navigation* im GPS-Empfänger nicht benutzt werden, die kleine Geschwindigkeiten herausfiltert. Daher wurden die Teile des

GPS-Logs manuell abgeschnitten, die beim Warten auf den Bus entstanden sind, da hier durch die springende Position in der Realität nicht existierende Wege entstehen würden. Letztlich mussten bis auf drei Messfahrten alle anderen aus Qualitätsgründen ausgeschieden werden. Die Stichprobe konnte durch Kombination dieser in zwei Abschnitte geteilte Fahrten, auf in Summe neun Fahrten erhöht werden, und damit die Problematik der Verschiebung der Haltepunkte durch Umbauten im Straßenraum bzw. Verlegung von Haltestellen umgangen werden.

In der folgenden Abbildung 39 werden die selektierten GPS-Aufzeichnungen mit ihren Verläufen der Geschwindigkeiten, und auch die maximalen Geschwindigkeiten in den einzelnen Segmenten, die durch die Positionen potentieller Zwangshalte (siehe Tabelle 15) getrennt werden, in Treppenform dargestellt.

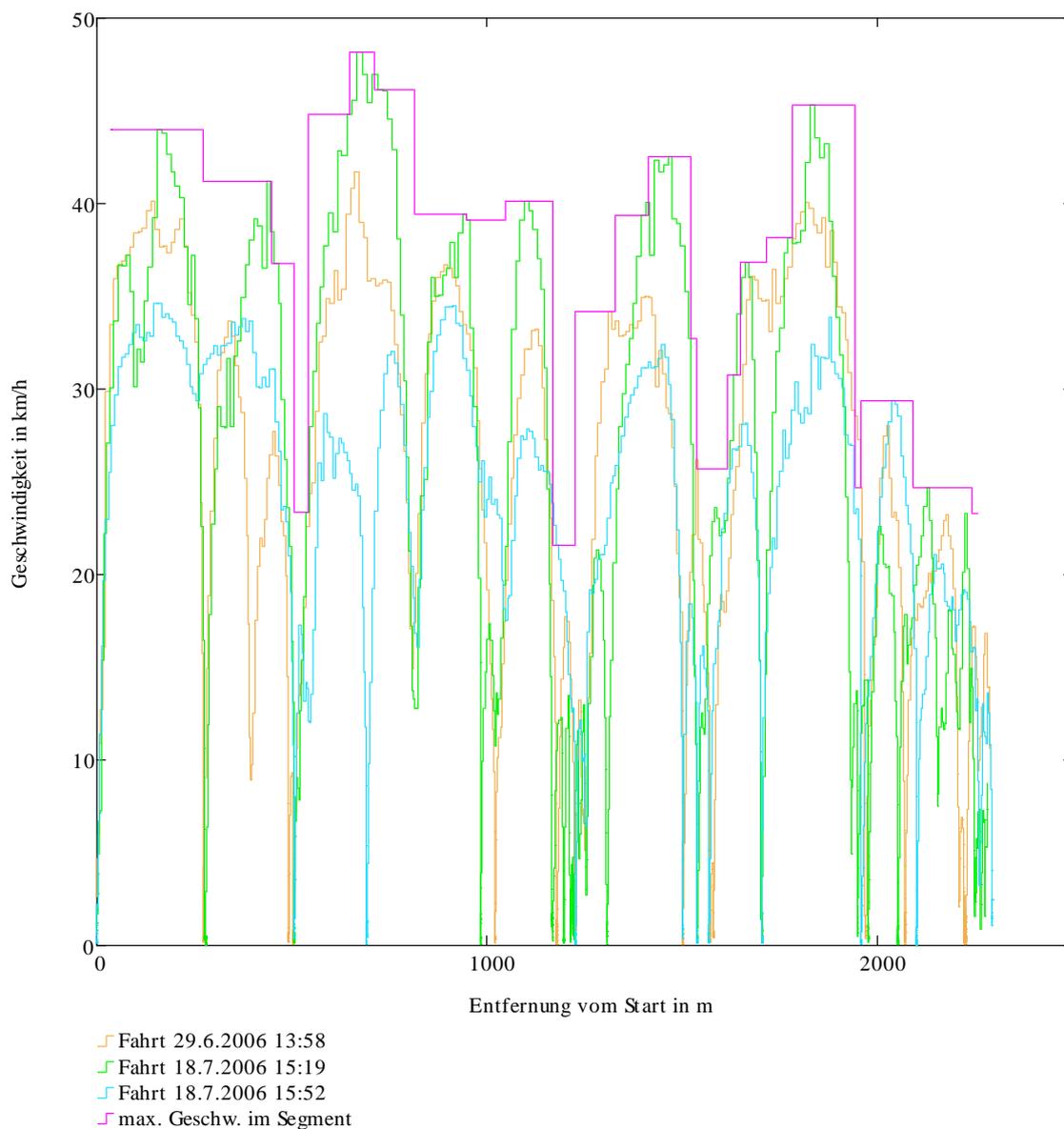


Abbildung 39: Fahrzyklen und Maximalgeschwindigkeiten in den Segmenten zwischen potentiellen Zwangshalten (alle Typen)- Auswertung dreier aufgezeichneter Fahrten

Die Fahrt vom 18.7.2006 15:52 weicht im Geschwindigkeitsniveau von den anderen Fahrten deutlich ab. Die führt zu einer hohen Variabilität der Daten und ermöglicht zusammen mit den anderen Fahrten eine praxisnahe Analyse des taktischen Energiemanagements.

Die für jedes Segment zwischen den Positionen potentieller Zwangshalte bestimmten Maximalgeschwindigkeiten werden benutzt, um die Energiemenge zu berechnen, die

1. maximal im vorausliegenden Segment benötigt werden könnte und
2. maximal in den Energiespeicher im aktuellen Segment einzuspeichern sein könnte.

Beide Werte für die Energien werden im Algorithmus für das taktische Energiemanagement zur Korrektur der Vorgaben für die SOC-Grenzen genutzt. Nach der Logik beeinflusst Punkt 2. die obere SOC-Grenze und Punkt 1 die untere SOC-Grenze. Diese Energien in den Segmenten sind statistische Werte, d. h. es wäre zielführend, im Betrieb diese Werte durch vorausfahrende Busse ermitteln oder anpassen zu lassen (siehe Kap. 12.5.2).

8.3 ERKENNUNG DER POTENTIELLEN ZWANGSHALTE

Entlang der Fahrstrecke wurden potentiellen „Zwangshalte“ identifiziert. Dies sind Stellen, an denen ein Anhalten oder starkes Verzögern des Fahrzeuges zu erwarten ist. Zwecks späterer Differenzierung, durch eine Bewertung der Auftrittswahrscheinlichkeit, wurde eine genaue Aufteilung der potentiellen Zwangshalte nach Kategorien, entsprechend Tabelle 15 vorgenommen:

Tabelle 15: Kategorien für potentielle Zwangshalte

0	HAST: Haltestelle
1	DHST: Doppelhaltestelle- Bus hält nur einmal, jedoch an einer von zwei möglichen Positionen
2	LSA:Lichtsignalanlage an einer Kreuzung
3	LSA ÖVV: Lichtsignalanlage mit Vorrangschaltung für den Bus
4	LSA FGÜ: Lichtsignalanlage Fußgängerübergang – Druckknopfampel
5	FGÜ: Fußgängerschutzweg (Vorrang für FußgängerInnen)
6	Warteposition am Ende eines potenziellen Verkehrsstaus
7	Verzögerung vor einer beinahe rechtwinkligen Kurve ohne Kreuzung oder LSA

Das Ende eines Verkehrsstaus kann sich in der Position verschieben, denn je nach Verkehrsaufkommen wächst das Stauende dem ankommenden Verkehr entgegen. Es handelt sich um ein stochastisches Ereignis, wenn einzelne (abbiegende) Fahrzeuge die Kreuzung blockieren können. Ebenso kann der Zusammenbruch des Verkehrs durch Einzelereignisse, wie sich langsam bewegende bzw. in zweiter Spur haltende Kommunalfahrzeuge, Zulieferer, Taxis o. ä. mittel- bis langfristig nicht prognostiziert werden. Es werden aber in Kap. 8.5.2 Lösungen für dieses Problem gesucht. Interessant für das Energiemanagement des Hybridantriebs ist das Erkennen von weiter vorgelagerten Stauenden. Dies ist eher wegen des Ortes des Anhaltens wichtig, und weniger wegen dem Energieverbrauch, weil vom Auftreffen auf den Stau bis zum Erreichen der Lichtsignalanlage, bei kleinen Beschleunigungen und Schrittgeschwindigkeit des Fahrzeuges, kaum Energie benötigt wird. Am anderen Ende der Skala für die Eintrittswahrscheinlichkeit befinden sich beinahe rechtwinklige Kurven. Hier sind, um stehende Fahrgäste nicht zu gefährden und ein Ausbrechen des Fahrzeuges zu verhindern, immer eine vorherige Verzögerung und danach ein Beschleunigen notwendig. Der Energiespeicher sollte vor einem solchen Verzögerungsereignis immer Platz für die bei der Rekuperation gewinnbare Energie haben, damit keine Bremsenergie verloren geht.

Die Bestimmung des Abstandes am Fahrweg zu den potentiellen Zwangshalten ist nicht exakt möglich, da die potentiellen Zwangshalte in absoluten Koordinaten vorliegen (in einer Karte eingerichtet wurden), die Fahrkurven aber auf gemessenen, also Fehler behafteten, über die Geschwindigkeit summierten Wegen basieren. Für jede Fahrt erscheinen die potentiellen Zwangshalte also an einem geringfügig anderen Punkt im Weg-Zeit-Diagramm. Die folgende

Tabelle 16 zeigt überblickshaft drei Möglichkeiten der Bestimmung der Abstände des Fahrzeuges zu den potentiellen Zwangshalten:

Tabelle 16: Datengewinnungsverfahren für den Abstand zu potentiellen Zwangshalten

Variante	Bewertung
Luftlinien-Distanz	Kann grob falsch sein
Odometrische Abbildung auf vorbestimmten mittleren Graphen der Fahrt	Näherung , ungenau bei Bauarbeiten bzw. zu umfahrenden Verkehrshindernissen
Odometrische Abbildung Weg auf aktuellen Graphen	Bis zur aktuellen Position nicht nötig , danach nicht möglich da zukünftiger Weg nicht bekannt

Mit dem aktuellen Graphen kann der Abstand zu potentiellen Zwangshalten, die ja noch vorausliegen, nicht bestimmt werden und es verbleibt immer ein Fehler bei der Bestimmung des Abstandes (siehe auch Abbildung 40), da ab der aktuellen Position des Fahrzeuges eine angenommene Fahrkurve benutzt werden muss, die möglicherweise von der aktuellen Fahrkurve abweicht.

8.4 STATISCHE ODER LERNENDE VERFAHREN DER DATENGEWINNUNG

Bei der Datengewinnung können fixe Datensätze oder Informationen von Verkehrstelematik zur Verbesserung der Daten genutzt werden. Die Simulation kann die **verorteten potentiellen Zwangshalte** nutzen, in dem der Abstand zu diesen beim Algorithmus zur Berechnung der Vorgaben für den untere und obere Schaltgrenze einfließt. Für die Genauigkeit der Angaben ist von Vorteil, wenn **eine interaktive Kommunikation zwischen Fahrzeug und Lichtsignalanlage** vorausgesetzt werden kann. Bei einer garantierten Durchfahrt (nach Anmeldung des Fahrzeuges an den Kreuzungsrechner und freier Kreuzung) kann der vermutete Zwangshalt geringer gewichtet (siehe auch Formel 28) oder gestrichen werden. Ein anderes Extrem, das ohne aktuelle Daten auskommt, wäre die Aufzeichnung der Fahrten und statistische Bestimmung des jeweiligen Energiebedarfs (196) in einem **statischen Ansatz**. Die vier möglichen Varianten der Datengewinnung werden in der folgenden Tabelle 17 im Detail verglichen:

Tabelle 17: Charakterisierung der Verfahren für das taktische Energiemanagement die potentielle Zwangshalte berücksichtigten

	Fixe Daten	Interaktive Datengewinnung
Statisches Verfahren	Positionen potenzielle Zwangshalte und Wichtungsfaktoren bei den Zwangshalten fix.	Abstände zu aktuellen Zwangshalten über Telematik beschafft. Wichtungsfaktoren sind fix.
Lernendes Verfahren	Wichtungsfaktoren für den Einfluss der festen Zwangshalte werden an die aktuellen Umstände angepasst.	Wichtungsfaktoren für die gewonnenen Informationen zu den potenziellen Zwangshalten werden an die aktuellen Umstände angepasst.

Nach einem Start mit vorgegebenen Wichtungsfaktoren können bei einem lernenden Verfahren mit fixen Daten die **Wahrscheinlichkeiten für potentielle Zwangshalte** in Abhängigkeit von Wochentag und Uhrzeit bestimmt werden. Derzeit erfolgt eine Anmeldung der Busse an den Kreuzungsrechner oft noch über Infrarot-Baken (197), weil damit Last vom (noch analogen) Betriebsfunk genommen werden kann. Damit können bei Verwendung von *Dedicated Short*

Range Communication DSRC nur punktuell Daten für die taktische Steuerung bereitgestellt werden. Das taktische Energiemanagement im Fahrzeug könnte aber über eine drahtlose Daten-Fern-Verbindung mit den Kreuzungsrechnern kommunizieren, wenn diese eine Datenschnittstelle und Abfragemöglichkeit anbieten würden (siehe 12.5.2).

8.5 BEWERTUNG DER DATENGEWINNUNGSVERFAHREN

8.5.1 DATENQUALITÄT UND ANFORDERUNGEN

Im Unterschied zu Literaturstellen, die eine Optimierung auf der Basis normierter Fahrzyklen vornehmen, wird hier versucht das Problem praxisnah, also **für vorher nicht genau bekannte Fahrkurven** zu lösen. Die Auswertung der odometrisch via GPS ermittelten Position der potentiellen Zwangshalte in Abbildung 40 zeigt die Abweichung bei der Abbildung der Positionen der potentiellen Zwangshalte auf den über GPS integrierten Weg. Es ist danach bei der Bildung der Differenz zwischen dem aus GPS-Signalen integrierten Weg und dem mittleren Weg der verorteten potentiellen Zwangshalte möglich, während der Fahrt den Abstand zum nächsten potentiellen Zwangshalt im Mittel auf 10 m genau zu bestimmen.

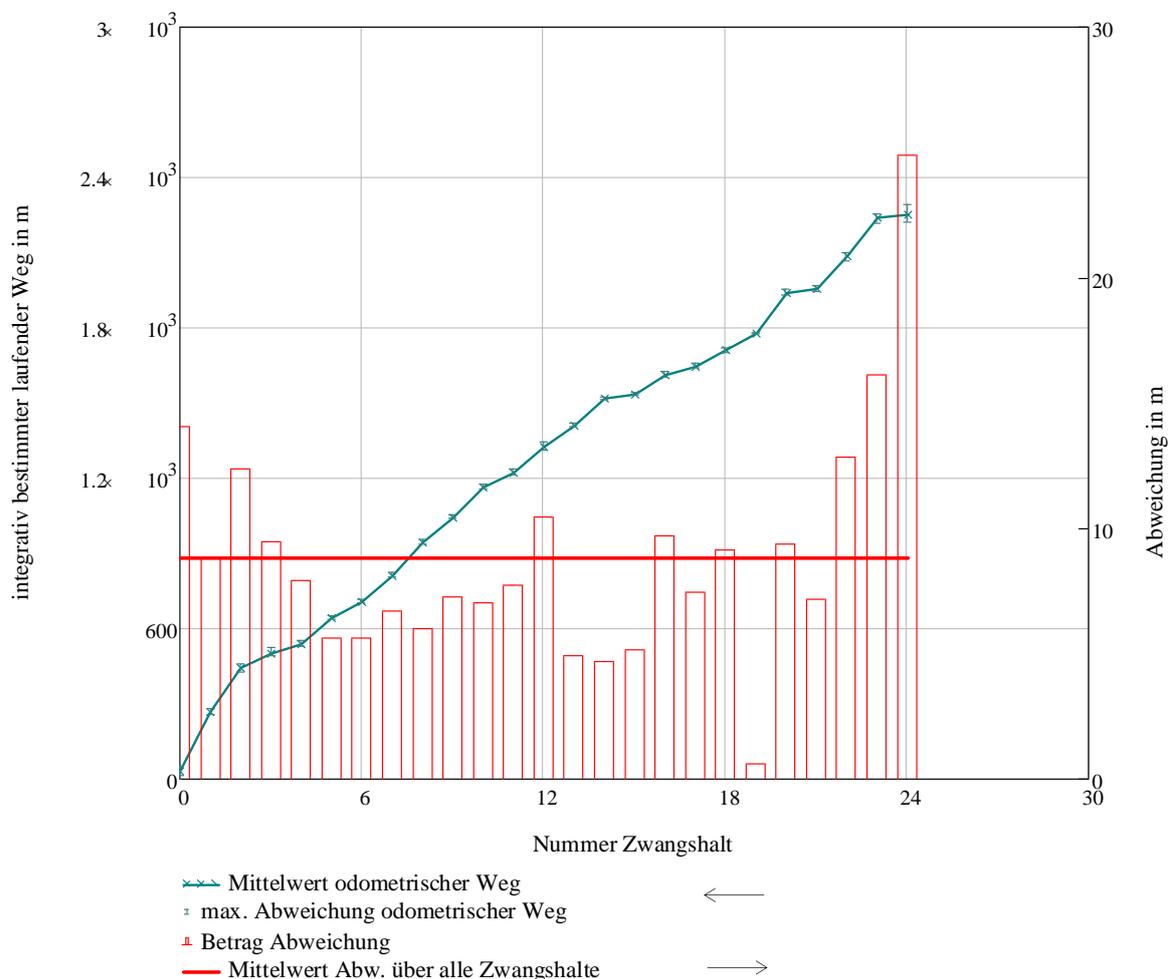


Abbildung 40: Genauigkeit der auf GPS-Geschwindigkeiten basierenden odometrischen Ermittlung der Abstände zur Position der potentiellen Zwangshalte

Die Gewinnung der Daten für die Prognose der zukünftigen Energieumsätze, die vom taktischen Energiemanagement benutzt werden können, spielt für die Übertragung des Optimierungsverfahrens in die Praxis eine große Rolle. Daher werden in Tabelle 18 die Anforderungen an die Datengewinnung umrissen.

Tabelle 18: Anforderungen zur Gewinnung der Daten für die Prognose der zukünftigen Energieumsätze

Kategorie	Anforderung
Erkennung	Es soll der nächste Zwangshalt mit einer hohen Wahrscheinlichkeit identifizierbar sein, dabei soll die Position des Zwangshaltes gleich genau oder genauer als die eigene Position (des Busses) vorliegen.
Aktualisierung	Sichere Zwangshalte müssen dabei durch Informationen über potentielle Zwangshalte ergänzt werden. Die Datenlage soll mit Näherkommen der Position des potentiellen Zwangshaltes aktualisiert werden können.
Zeithorizont	Die Information über den nächsten potentiellen Zwangshalt muss rechtzeitig erfolgen. Da der mittlere Energiebedarf pro Zeiteinheit sich auf 17 – 25 kJ / s beläuft wäre, bei einem Speicherinhalt von 3000 kJ, eine Vorausschau von 175 Sekunden optimal.

8.5.2 SYSTEMARCHITEKTUREN DATENGEWINNUNG

In der Praxis ist bei der Nutzung von potentiellen Zwangshalten für die Steuerung der SOC-Grenzen der Hystereseregulation ein Nachziehen der erhobenen Angaben im Laufe der Zeit nötig. Bestimmte Werte wie z. B. häufige Stauenden können auch automatisch aus den laufenden GPS-Messungen der vorausfahrenden Busse abgeleitet und in das Modell eingepflegt werden. Haltestellen sind entweder schon verortet, oder können ebenso aus dem *Intermodal Traffic Control System* ITCS (neuer Begriff für das Rechnergestützte Betriebs-Leitsystem RBL) übernommen werden. Bei durch Baustellen bedingten Abweichungen ist jedoch ein manueller Eingriff nötig, außer es können die Daten automatisch bei den Fahrten gewonnen werden. Die **Daten-Update-Taktik** für eine vorausschauende Steuerung des Stromerzeugers in der Praxis könnte wie folgt aussehen:

Tabelle 19: Datenquellen für potentielle Zwangshalte im ÖPNV

Datum	Pflege der Daten
Fahrzeugdaten	Hinterlegt im Fahrzeugrechner
Fahrzeugbelegung/ Besetzungsgrad	Online Fahrgastzählung oder historische Werte aus Messungen
Haltestellen	1. Unternehmens-GIS oder 2. empirische Daten ITCS mit GPS-Position bei Türöffnung
Doppelhaltestellen	1. Unternehmens-GIS oder 2. empirische Daten ITCS mit GPS-Position bei Türöffnung
Lichtsignalanlagen LSA	1. Unternehmens-GIS oder 2. empirische Daten ITCS mit GPS-Position bei für LSA typischen Fahrmustern
Lichtsignalanlagen mit ÖPNV Bevorzugung	Unternehmens- oder städtisches GIS
Druckknopfampeln Fußgänger	1. Unternehmens-GIS oder 2. empirische Daten ITCS mit GPS-Position bei für Druckknopfampeln typischen Fahrmustern
Schutzwege/ Fußgängerübergang	Unternehmens- oder städtisches GIS
Stauende	Empirische Daten ITCS-GPS aus dem laufenden Betrieb
Scharfe Kurve (~90°)	Unternehmens GIS oder Auswertung ITCS-GPS

Zusätzlich zur Positionsbestimmung über GNSS, kann im Fahrzeug eine **logische Ortung** über Odometrie oder eine Auswertung der **Kinematik** durch Beschleunigungssensoren zur Anwendung kommen. Die GNSS Weiterentwicklung (GPS2, Galileo) machen diese AGPS-Verfahren (198), außer in Situationen ohne Sichtbarkeit von Satelliten, für die Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung obsolet. Für die Differenzierung von potentiellen Zwangshalten sind kinematische Daten u.U. hilfreich, ebenso wie Daten der Türbetätigung.

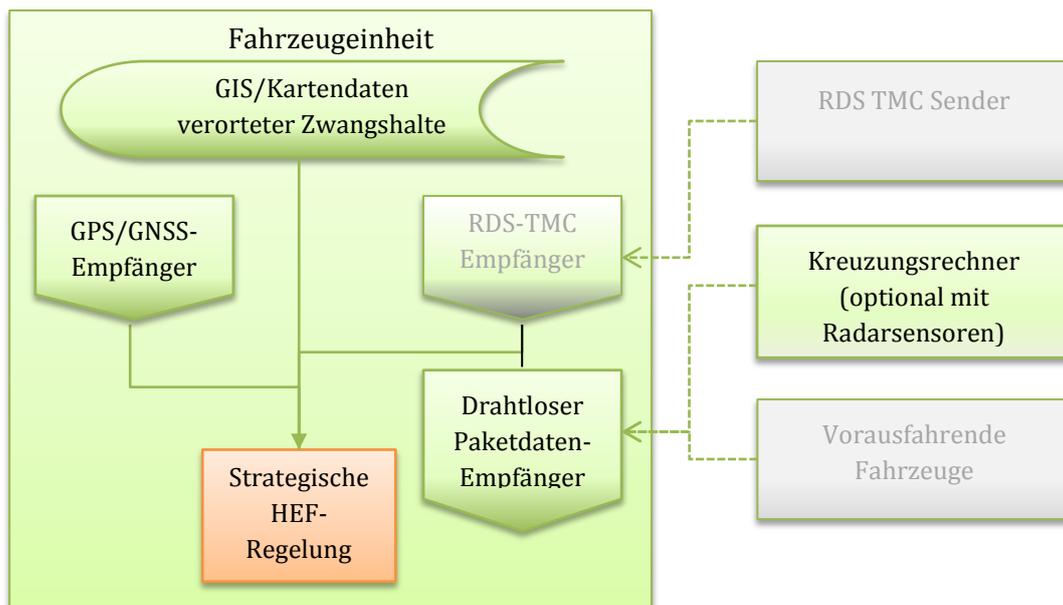


Abbildung 41: Vorschlag Systemarchitektur für eine zukünftige Datenversorgungsmöglichkeit zur genaueren Definition potentieller Zwangshalte für die taktische HEF-Regelung (grün=empfohlen)

Vorwärts gerichtete **Radarsensoren** am Fahrzeug sind im Stadtverkehr aufgrund der Kurzfristigkeit bis zum Eintreten für den erforderlichen Zeithorizont nicht geeignet. Informationen, von Kreuzungsrechner oder vorausfahrenden Fahrzeugen für einen etwas längeren Zeithorizont erhalten werden können sind u.U. hilfreich. Abbildung 41 zeigt die möglichen Datenquellen und macht einen Vorschlag für eine Systemarchitektur für das taktische Energiemanagement. Die in Abbildung 41 dargestellte Auswahl der Datengewinnungsverfahren wird im folgenden Kapitel 8.5.3 erläutert.

8.5.3 BEWERTUNG DER DATENGEWINNUNGSVERFAHREN

Bei der Bewertung der Informationsdienste, die Verkehrsdaten bereitstellen, ist nicht nur die Genauigkeit der Datenerfassung relevant, sondern auch der Zeithorizont für die Prognosen und die geographische und zeitliche Auflösung der bereit gestellten Daten, entsprechend den Anforderungen nach Tabelle 18. Der *Radio Data System Traffic Message Channel RDS-TMC* fokussiert mit den Informationen eher auf Ereignisse, die das Routing beeinflussen. *RDS-TMC* ist daher nicht zeitnah genug und deckt auch nicht den gesamten Straßenraum ab. Am ehesten könnte eine **Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation** mit **Kreuzungsrechnern** sinnvoll für die Datengewinnung sein, weil eine Anmeldung der Fahrzeuge bei ÖPNV-Vorrangschaltung erfolgt und damit bereits ein Kommunikationskanal vorhanden ist. Die Verbreitung von breitbandiger mobiler Datenübertragung hat hier neue Möglichkeiten eröffnet. Wenn der Kreuzungsrechner Informationen von Induktionsschleifen oder einer Bilderkennung bezieht, sind genauere Angaben über die Stauzone möglich. Ohne diese zusätzlichen Informationen können Hindernisse wie z. B. sich stauende Fahrzeuge, die die an und für sich freie Durchfahrt an Kreuzungen mit LSA behindern, nicht erkannt werden, womit die Datenlage durch die interaktive Datengewinnung kaum verbessert werden könnte.

Es wäre auch möglich, dass **Diensteanbieter** (anonymisierte) GPS-Messungen mobiler Endgeräte auswerten und die Informationen zur Verwendung anbieten. Google nutzt bereits anonyme Daten für den eigenen Routingdienst (199). Fußgänger, die die Straße verkehrswirksam auf Schutzwegen queren, werden damit jedoch schwerlich automatisch und vor allem rechtzeitig erkennbar sein.

Die **Fahrzeug-Fahrzeug Kommunikation** erfordert ebenso, wie Dienste, die GPS-Daten von Mobiltelefonen anonym sammeln und auswerten, eine hohe Durchdringung mit den damit ausgerüsteten Fahrzeugen. Dabei wären dezentrale Systeme geeignet, mittels Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation, Daten für das taktische Energiemanagement bereitzustellen. Für die Attraktivität des Geschäftsmodells scheint eine anonyme dezentrale Datenhaltung aber nicht förderlich zu sein.

In der folgenden Tabelle 20 wird die Eignung von Telematiksystemen für die Datengewinnung im Rahmen des taktischen Energiemanagements technisch bewertet.

Tabelle 20: Bewertung Datenversorgung im ÖPNV für die Entfernung zu potentiellen Zwangshalten

	Daten	Nutzung	Bewertung / Nutzungsempfehlung	
Statische Kartendaten	Weg, Richtgeschwindigkeit, Position potentielle Zwangshalte	Eindimensionale Daten für Linienbusse ausreichend, Verortung der Zwangshalte.	Als Grundlage für alle Verfahren verfügbar.	Ja
Individuelle historische Daten	Wahrscheinlichkeit Energieumsatz	Statistische Auswertung der Fahrten, am besten online sofort verfügbar gemacht.	Verbessert prognostizierte Energieumsätze, aber nur statistische Wirkung, da keine aktuellen Daten.	Ja
Fortschrittliches RDS-TMC	<i>Floating car data</i> , aktuelle Zahl der Fahrzeuge	Kategorisierung der Fahrt, Energiebedarf der Streckenabschnitte.	Linienbusse haben bei kurzen Intervallen bereits selbst eine gute Datenlage.	Nein
Fahrzeug-Infrastruktur Kommunikation	Zwangshalte bei LSA, ggf. Verkehrsdichte	Bewertung von LSA, im Hinblick auf die Wahrscheinlichkeit des Anhaltens.	Sollte mit einbezogen werden, wenn eine Kommunikation zur Anmeldung des Busses beim Kreuzungsrechner erfolgt und die Kreuzungsrechner über Sensoren verfügen.	Wenn möglich
Fahrzeug-Fahrzeug Kommunikation	Geschwindigkeit, Zwangshalte vorausfahrende Fahrzeuge	Erkennung von Staus, Korrektur des Energiebedarfs im vorausliegenden Abschnitt.	Kann mangels Verbreitung derzeit nur innerhalb der eigenen Busflotte genutzt werden. Busse haben ggf. eigene Fahrspuren.	Nein
Fortschrittliche Fahrer Assistenzsysteme (ADAS)	Veränderungen der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeuges, Kurvenradien, Verkehrszeichen, Geschwindigkeitsbegrenzungen	Korrektur des Energiebedarfs im vorausliegenden Abschnitt und Erkennung zusätzlicher nicht verorteter potentieller Zwangshalte über die Messung der Geschwindigkeit vorausfahrender Fahrzeuge.	Zu kurzfristige Informationen im dichten Stadtverkehr, erst sinnvoll bei Integration in die Fahrzeug-Fahrzeug Kommunikation und bei großer Verbreitung.	Nein

Über generische nomadische Geräte mit Positions- und Beschleunigungssensor könnte über ein Applet ein Austausch von verkehrsrelevanten Daten zwischen den VerkehrsteilnehmerInnen erfolgen. Abgesehen von der Motivation dieses Applet zu verwenden und sich als FußgängerIn oder mit dem Fahrzeugtyp zu deklarieren, spricht der Energiebedarf während der Nutzung des GPS derzeit gegen eine hohe Verbreitung bei nicht motorisierten Verkehrsteilnehmern.

Das taktische Energiemanagement kann einfacherweise mit einer manuellen Verortung von Zwangshalten und historischen Fahrkurven starten, aus denen die Wahrscheinlichkeit der potentiellen Zwangshalte abgeleitet werden kann. Wenn die statischen Daten für die potentiellen Zwangshalte verbessert werden sollen, dann für Linienbusse im Stadtverkehr am besten über die Daten vorausfahrender Busse sowie Daten von Kreuzungsrechnern. Kreuzungsrechner können über eine Erfassung des Verkehrs mittelfristig und nach einer Anforderung einer Passage durch den Bus und Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Erreichens der geplanten Grünphase auch kurzfristig die Wahrscheinlichkeit des Anhaltens ermitteln, und z. B. über *WAVE*, *DSRC* o. ä. an den Bus kommunizieren.

9 MODELLIERUNGSANSATZ DES TELEMATIK-GESTÜTZTEN TAKTISCHEN ENERGIEMANAGEMENTS

9.1 EINLEITUNG

In diesem Kapitel werden Verfahren für die Optimierung des Einsatzes des Motor-Generator-Satzes im Betrieb entwickelt und die darin genutzten Algorithmen beschrieben. Die Verfahren sind parametrierbar, das folgende Kapitel 10 untersucht die Sensibilität des Modells in Hinblick auf die Parameter bevor in Kapitel 11 und 12 eine automatische Optimierung der Parameter eingesetzt wird.

9.2 ANSÄTZE FÜR EINE REGELUNGSTAKTIK SERIELL-HYBRIDER ANTRIEBE

9.2.1 AUFGABENSTELLUNG FÜR DIE OPTIMIERUNG VON HYBRIDANTRIEBEN

Optimalität kann im Bereich Hybridantriebe verschieden interpretiert werden. Die Optimierung der Fahrbarkeit im Betrieb (definiert über das menschliche Empfinden während der Interaktion mit dem Fahrzeug) fokussiert auf sehr kurzfristige Ereignisse, wie die Zugkraftunterbrechung und steuert den Einsatz der VKM, um ohne Abweichung dem Fahrerwunsch am Fahrpedal nachzukommen. Durch die **Vorgabe von Fahrkurven** in der Simulation liegt die Fahrbarkeit hier aber außerhalb des Betrachtungsraums, ausgenommen die Tatsache, dass im Energiespeicher immer genügend Energie vorhanden sein muss, um die benötigte elektrische Leistung für den Simulationsschritt abrufen zu können.

Im realen Betrieb kann das Ziel für das **Energiemanagement** wie folgt definiert werden (200):

„Bestmögliche Nutzung und Rekuperation der Gesamtenergie im Fahrzeug.“

Im konkreten Fall besteht die Aufgabenstellung darin, über eine vorhergehende Optimierung geeignete Faktoren zu finden um ein taktisches Energiemanagement im Betrieb zu ermöglichen, welches aufgrund der vorhergehenden Optimierung des Verfahrens keine großen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Rechenumgebung an Bord stellt. Hierbei wird auch der in Kapitel 9 entwickelte optimale Einsatz des Motor-Generator-Satzes auf Basis der in Kapitel 7.2 beschriebene Optimierung des Betriebspunktes mit einbezogen.

9.2.2 RECHERCHEERGEBNIS MÖGLICHE OPTIMIERUNGSVERFAHREN

Es wurden für die Optimierung des Betriebs von hybriden Antrieben verschiedene Optimierungsansätze in der Literatur gefunden, die sich grundsätzlich unterscheiden. Viele Veröffentlichungen haben sich mit der absoluten Optimierung beschäftigt. Die Optimierung d. h. Minimierung von Verbrauchs- und der Emissionssummen, die vom Betrieb des Fahrzeuges abhängen, stellt ein globales Problem dar, das nur bei vorliegender Fahrkurve gelöst werden kann. Alle Lösungen müssen dabei die Fahrkurve $v(t)$ erfüllen und der Energieinhalt im Speicher und das zulässige Antriebsmoment müssen für die Erfüllung der Fahrkurven ausreichen. Zur Lösung des Gesamtproblems ist eine Optimierung während der gesamten Fahrt nötig, die dafür vollständig im Vorhinein bekannt sein muss. Daher handelt es sich bei dieser Art der Optimierung um einen theoretischen Ansatz, wobei das absolute Optimum nur retrospektiv gefunden werden kann (*ex post*).

Unabhängig vom Vorliegen einer prognostizierten oder gemessenen Fahrkurve werden bei der Suche des Verbrauchsminimums Verfahren zur Lösung verwendet, wie das *Dynamic Programming DP* (201), in Form der deterministischen und stochastischen dynamischen Programmierung. Eine schrittweise Suche des Optimums durch ein Gradientenverfahren versagt, wenn es mehrere lokale Minima gibt. Beim *Simulated Annealing* (202) wird versucht

dieses Problem durch zwischengeschaltete zufällige Änderungen zu lösen. Neben der Nutzung von *DP* ist es für die Suche nach Lösungen nahe dem Optimum aber auch möglich Lösungen über Genetische Algorithmen zu entwickeln, wo sich Mutationsschritte mit Bewertungsschritten abwechseln. Damit können Lösungen gefunden werden, die einer optimalen Lösung sehr nahe kommen. Eine *Monte-Carlo Variation (MC-Variation)* ist dagegen ein *brute-force* Ansatz, mit dem ein Optimum auch bei vielen Faktoren zufällig gefunden werden kann, da sehr viele Lösungen untersucht werden. Im einfachsten Falle wird die *Monte-Carlo* Methode zur Lösung analytischer Aufgaben, wie der Berechnung von Integralen benutzt (203). Sie wird aber auch und vor allem in Simulationen genutzt, um Lösungsräume untersuchen zu können. Inwieweit eine zufällige Lösungssuche alle Lösungsansätze abdecken kann, hängt von der Granularität des Suchmusters ab. Je größer das mehrdimensionale Suchgitter, desto höher die Wahrscheinlichkeit das Optimum zu verfehlen. Dabei ist auch die Auswahl einer guten Stichprobe von Zufallszahlen wesentlich, um Scheinkorrelationen zu vermeiden. Es ist auch möglich *Monte-Carlo-Variation* und Genetische Algorithmen zu kombinieren (204), indem die *MC-Variation* für die Mutation benutzt wird.

Die unterschiedlichen Ansätze bei der Optimierung zeigt Abbildung 42:

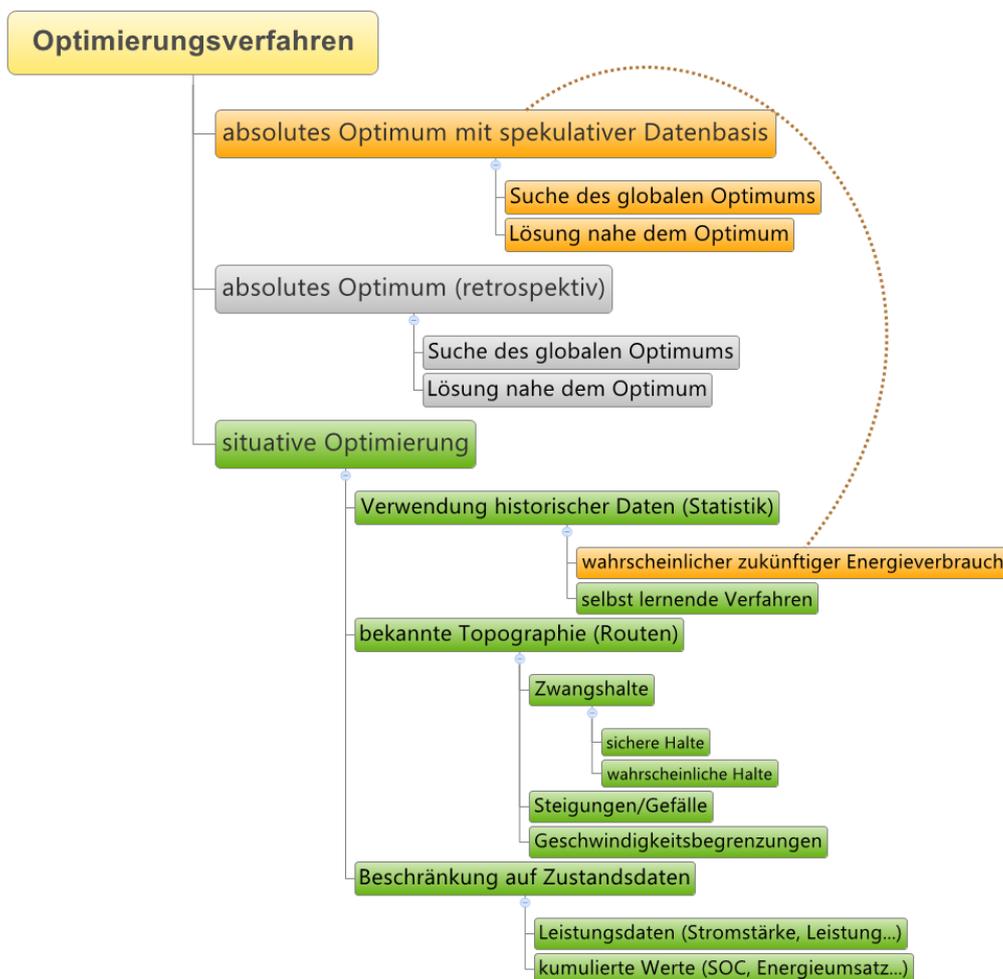


Abbildung 42: Optimierungsansätze nach Datenverfügbarkeit und Analyseverfahren (Darstellung in XMind)

Eine **retrospektive Optimierung** bietet aufgrund der im Vorhinein vollständig bekannten Fahrkurve die besten Voraussetzungen für die Suche nach dem Optimum. In der Praxis verunmöglichen nicht vollständig im Voraus bekannt Fahrkurven diesen Ansatz.

Bei der **situativen Optimierung**, die ohne genaue Kenntnis über die zukünftige Fahrkurve auskommt, gibt es drei Unterscheidungsmöglichkeiten. Erstens können für das taktische Energiemanagement alle diejenigen Daten genutzt werden, die bekannt sind, wenn dem Fahrzeug eine bestimmte Route vorgeschrieben wird. Damit können bekannte in der Zukunft liegende Daten genutzt werden, auch wenn diese mit einer Unsicherheit behaftet sind. Steigungen und Gefälle sind fixiert, über Geschwindigkeitsbegrenzungen oder vorhergehende Messungen ist es möglich ein zukünftiges Geschwindigkeitsprofil abzuschätzen, besonders außerhalb von Ortschaften. Im verbauten Gebiet gibt es durch Ampeln und Stopp-Tafeln bestimmte Punkte, wo ein Anhalten sicher, oder zumindest wahrscheinlich ist. Dazu kommen noch Stauzonen und Fußgängerübergänge, die eine bestimmte Wahrscheinlichkeit für einen Halt erzeugen. Besonders für kommerzielle Verkehre kommen definierte Halte hinzu, für Paketdienste Abgabestellen und für Busse Haltestellen. Allen Halten kann eine bestimmte Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet werden. Einige Halte bzw. zukünftige potentielle Ereignisse, die die Fahrt beeinflussen, sind über **Telematiksysteme** eruierbar, die Verkehrsteilnehmer vernetzen. Es ist auch möglich bei der situativen Optimierung der taktischen Steuerung eines Stromerzeugers eines seriell-hybriden Antriebes vollständig auf Prognosewerte zu verzichten und nur die gerade verfügbaren Daten in einer heuristischen Art zu nutzen. Dabei können **aktuelle Zustandsdaten** für die situative Optimierung genutzt werden, vorzugsweise diejenigen, die die (elektrischen) Verluste beeinflussen wie Stromstärken und Spannungen und andererseits **kumulierte Daten** wie z. B. der Ladezustand (*State-of-Charge* SOC) oder die Laufzeit des Generators (siehe Formel 29). Der Algorithmus oder das Verfahren (NN, Fuzzylogik etc.) kann das Aus- oder Einschalten des Motor-Generator-Satzes in Abhängigkeit von bestimmten Zustandsgrößen forcieren, indem die fixen SOC-Grenzen der Hystereseregulierung modifiziert werden.

Neben der Nutzung von strengen mathematischen Zusammenhängen für die Regelung, wäre die Verwendung von **Fuzzylogik** oder von **Neuronalen Netzwerken NN** zur Berechnung von Lösungen in Abhängigkeit von Zustandsgrößen des Antriebs oder Abständen zu potentiellen Zwangshalten ein möglicher Ansatz. Die Optimierung der Fuzzy-Logik-Regeln und das Training des Neuronalen Netzwerkes könnten aufgrund des erforderlichen Rechenaufwandes vorher oder in einem parallelen Prozess erfolgen und die Zielplattform für die Steuerung des Stromerzeugers am Fahrzeug unterstützen. Fuzzylogik und NN erfordern umfangreiche Berechnungsbibliotheken, die im vorliegenden Fall die *Monte-Carlo*-Simulation zu stark verlangsamt hätten. Daher wurde ein in mathematische Formeln gekleideter Algorithmus in der Simulation zur Modulation der SOC-Vorgaben benutzt.

9.2.3 BEKANNTER STAND DER TECHNIK TAKTISCHE REGELUNGSANSÄTZE

Bei parallel hybriden Pkw wurde die Nutzung von Navigationssystemen und von Telematik für die prädiktive Datengewinnung für eine *DP*-Optimierung getestet (205), wobei auch ein Fahrermodell zum Einsatz kam und Einsparungen von 2 % berichtet wurden. Um eine *DP* in Echtzeit einsetzen zu können, musste aus Performanzgründen das Fahrzeugmodell linearisiert und der Suchraum sowie der Regelungshorizont beschränkt werden.

An der ETH Zürich wurde ab 2009 eine prädiktive (vorausschauende) Regelung entwickelt, die das Höhenprofil der Strecke für die Optimierung eines seriell-hybriden Antriebes eines Busses berücksichtigt (206). Leider wird hier (bisher) für den Verbrauch nur ein Vergleich zum Bus mit konventionellem Antrieb gemacht. Die Einsparung von 25 % liegt in der Mitte zwischen den konservativen Annahmen der Betreiber von 20 % (207) und Aussagen der Anbieter von 30 % (208) und daher sind weitere Publikationen aus dem Projekt *AHEAD - Advanced Hybrid Electric Autobus Design* abzuwarten (206).

In der Literatur werden auch mehrschichtige Konzepte für eine Regelung erwähnt, die einerseits die Fahrbarkeit gewährleisten und andererseits die Emissionen verringern, in dem der zukünftige Bedarf an VKM-Leistung prognostiziert wird (209). Dieser Ansatz wird hier jedoch nicht benötigt, da beim seriell-hybriden Antrieb die Fahrbarkeit durch den rein elektrischen Antrieb gewährleistet ist.

Für seriell-hybride Antriebe wurde in der Simulationsumgebung *Advisor 2002* eine differenzierte situative Regelung (210) des *fuel converters* (z. B. Motor-Generator-Satzes) eingesetzt, die diesen, abhängig von der benötigten Energie für den Antrieb, ab einem bestimmten Leistungsbedarf dauerhaft eingeschaltet lässt. Dieser Schwellenwert wird über den aktuellen SOC korrigiert und somit eine Hystereseregulierung überlagert.

Im Falle der Verwendung von kaskadierten Energiespeichern, die eine Sekundärbatterie durch EDLC entlasten, wurde eine differenzierte Regelung entwickelt, die einen Korrekturfaktor benutzt, der den Ladezustand des Speichers (im zitierten Fall der Sekundärbatterien) berücksichtigt. Die Regelung (211) bestimmt einen Referenzwert für den Ladestrom des EDLC. Dieser Referenzwert wird über Geschwindigkeit des Fahrzeuges und Ladezustand der Sekundärbatterie geregelt. Je höher die Geschwindigkeit des Fahrzeuges und je höher der Ladezustand der Sekundärbatterie, desto niedriger ist die Vorgabe für den zu erreichenden Ladezustand des EDLC. Diese Regelungstaktik, in dem kombinierten System aus EDLC und Sekundärbatterie, zielt darauf ab, dass die aktuelle nutzbare kinetische Energie beim Rekuperieren gespeichert werden kann, und berücksichtigt die Aufnahmefähigkeit der zusätzlichen Sekundärbatterie. In der zweiten Ebene der Regelung wird dann noch das Verhältnis Batteriespannung zu Spannung des EDLC dazu genommen, um zu bestimmen ob der EDLC geladen oder entladen werden soll.

9.3 ARBEITSHYPOTHESE FÜR DAS TAKTISCHE ENERGIEMANAGEMENT

9.3.1 BASIS-REGELUNGSMODELL ZUR OPTIMIERUNG WÄHREND DER FAHRT

Abbildung 43 erläutert graphisch die Basisüberlegung für die taktische Regelung eines Stromerzeugers für einen seriell-hybriden Antrieb mit einem Energiespeicher. Es werden sowohl die **Abstände zu zukünftigen potentiellen Zwangshalten** mit den jeweiligen **Eintrittswahrscheinlichkeiten** berücksichtigt, als auch die aktuellen Zustandsdaten des Stromerzeugers und -speichers, die die Vergangenheit abbilden. Ein heuristischer Algorithmus wird genutzt um aus den Entfernungen zu den potentiellen Zwangshalten ein taktisches Energiemanagement abzuleiten.

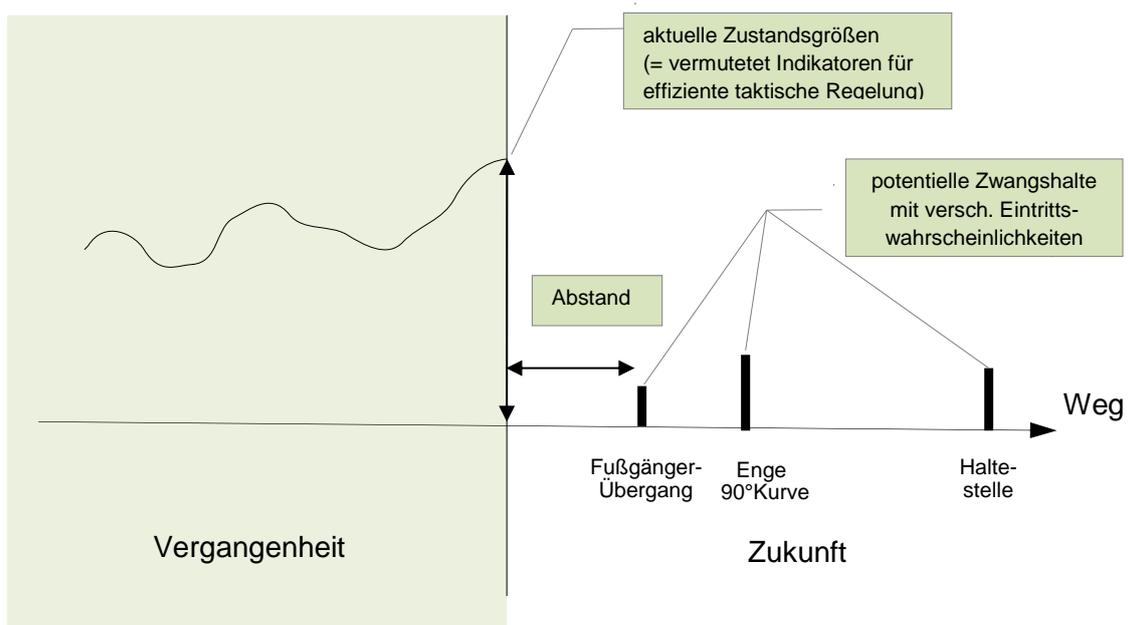


Abbildung 43: Implementierungsprinzip für die prädiktive taktische Regelung mit Nutzung von Zustandsgrößen und Abständen zu potenziellen Zwangshalten

Bei der Nutzung von aktuellen Zustandsdaten, kommen bei einem Einsatz des Fahrzeuges im Stadtverkehr mehrere Varianten in Frage. Einerseits kann der Einfluss aller **Zustandsgrößen des Hybridantriebes** untersucht werden, die die Effizienz beeinflussen. Andererseits können Größen berücksichtigt werden, die charakteristisch für den **Energieumsatz der Fahrt** sind. Ziel der Arbeit war es einen Algorithmus zu entwickeln der die Zustandsgrößen und die Informationen über die Zukunftsdaten gewichtet so zusammenführt, dass sich ein Minimum für den Verbrauch bei der gewählten Größe des Energiespeichers ergibt. Der Algorithmus soll einen minimalen Rechenaufwand erzeugen und minimale Voraussetzungen an den Fahrzeugrechner stellen, um eine **einfache Integration** in bestehende Systeme zu ermöglichen. Eine Optimierung im Hinblick auf die Emissionen ist mit dem gewählten Verfahren ebenso möglich, wobei zu entscheiden ist, wie diese bewertet und mit dem Verbrauch zusammen geführt werden sollen.

Die Logik der **Hystereseregulung** des Motor-Generator-Satzes, die in der Simulation zur Erzielung eines Verbrauchsoptimums modifiziert wird, zeigt Abbildung 44:

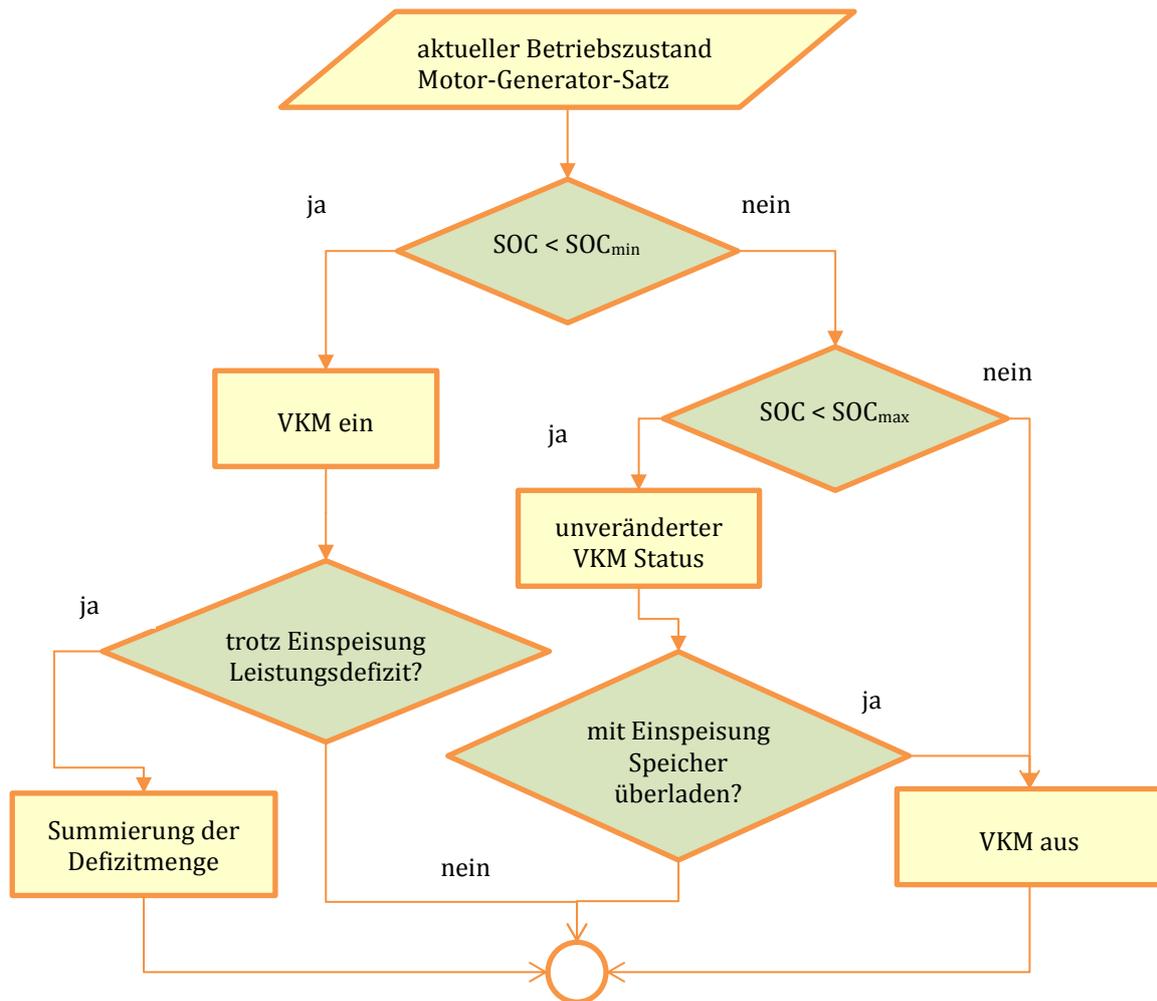


Abbildung 44: Entscheidungslogik Hystereseregulung für den Einsatz des Motor-Generator-Satzes in der Simulation

Es wurde in der Regelung des SOC nach Abbildung 44 vorgesehen, die Leistung weiter über den optimalen Betriebspunkt des Motor-Generator-Satzes zu erhöhen, wenn es wahrscheinlich ist, dass innerhalb weniger Sekunden der Inhalt des Energiespeichers aufgebraucht ist, auch wenn der Motor-Generator-Satz bereits eingeschaltet ist. Ebenso wurde eine zweite untere SOC-Grenze eingeführt, um einen solchen Fall durch Teillastbetrieb des Motor-Generator-Satzes möglichst zu vermeiden, da der Wirkungsgrad des Motor-Generator-Satzes bei geringer Reduktion der Last unter den Bestpunkt besser als bei Volllast ist. Die Logik für die mittlere Schaltgrenze fügt zusätzlich die Bedingung hinzu, dass der Energieinhalt im Energiespeicher während zwei Zeitschritten stetig gesunken ist. Sie ist ansonsten ident mit der für die untere Schaltgrenze SOC_{min} und beide Grenzen werden hier fest gekoppelt.

Die erweiterte Hystereseregulung triggert im Betrieb folgende also drei **Aktionen**:

- Obere SOC-Grenze schaltet Motor-Generator-Satz ab.
- Mittlere SOC Grenze schaltet auf beinahe optimale Last des Motor-Generator-Satzes, um eine vollständige Entleerung abzufangen (Notprogramm).
- Untere SOC Grenze schaltet auf optimale Last des Motor-Generator-Satzes.

In einer ersten Überlegung wurde der Motor-Generator-Satz mit beinahe Volllast betrieben, wenn bei der aktuellen Entnahme aus dem EDLC in drei Sekunden eine vollständige Entleerung eintreten würde. Diese Variante wurde während der Arbeiten zugunsten des frühzeitigen

Betriebs mit geringerer Last verworfen, da diese einen stabileren Betrieb ermöglicht, und der Verbrauch bei Volllast stärker ansteigt.

9.3.2 MODULATION DER SCHALTGRENZEN (SOC-VORGABEN)

Durch den zu entwickelnden heuristischen Algorithmus im taktischen Energiemanagement soll der **oberer und unterer SOC** der (modifizierten) Hystereseregulierung **moduliert** werden. Die vermutete, von zukünftigen Ereignissen bzw. dem erwarteten Energieumsatz und den Zustandsfaktoren abhängige, Logik bei der Verschiebung der SOC-Grenzen für die Hystereseregulierung zeigt Abbildung 45. Die zu erwartenden Energieumsätze und der Abstand zum Eintreten werden dabei ebenso zur heuristischen Modifikation der SOC-Grenzen herangezogen, wie die Zustandsfaktoren.

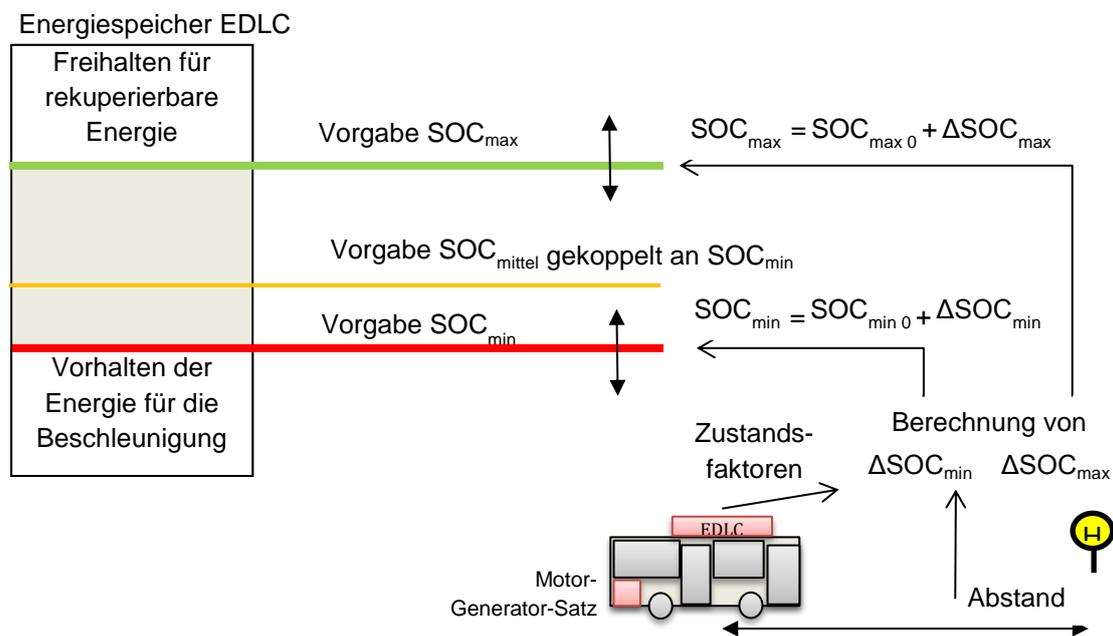


Abbildung 45: Ansatz für die Beeinflussung der SOC-Grenzen bei der Hystereseregulierung ΔSOC kann je nach Einflussmodell positiv oder negativ sein

Zum besseren Verständnis der Hystereseregulierung wurde der (indirekte) Einfluss der Änderung der oberen und unteren Schaltgrenze auf den Verbrauch in Abbildung 46 zusammengefasst.

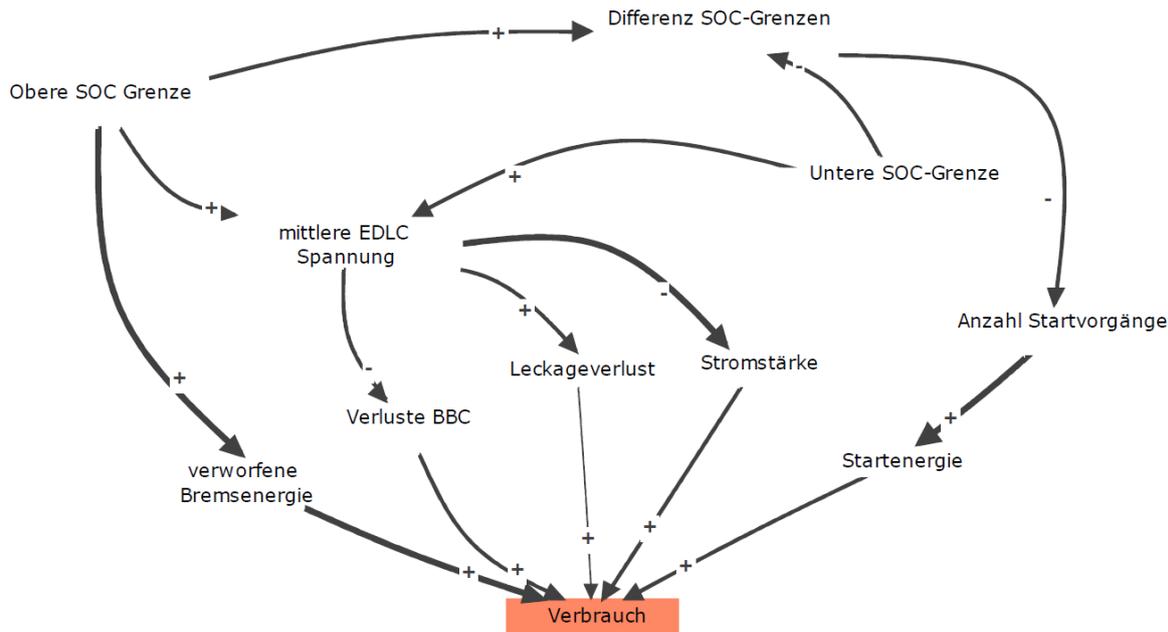


Abbildung 46: Einfluss der SOC-Grenzen auf den Verbrauch (Consideo Modeller)

Die Darstellung in Abbildung 46 ist über die Angabe der Wirkrichtung und Wirkung selbst (Strichstärken) halbquantitativ. Eine Auswertung der aktiven Beiträge der SOC-Grenzen zeigt eine größere Bedeutung der oberen SOC-Grenze für den Verbrauch, da über eine Erhöhung der oberen SOC-Grenze auch die Rekuperation der Verzögerungsenergie gefährdet wird.

Abhängig von der maximalen Geschwindigkeit in den Segmenten zwischen den potentiellen Zwangshalten, können die Energieumsätze im Voraus abgeschätzt werden. Dabei müssen bei der Berechnung der Energieumsätze aus den Maximalgeschwindigkeiten für die Beschleunigung heuristisch Annahmen getroffen oder die Mittelwerte der Integrale des Geschwindigkeitsverlaufes benutzt werden. Im verwendeten heuristischen Modell werden für die Berechnung die absoluten Geschwindigkeitsmaxima aller simulierten Fahrten und Rampen mit konstanter Beschleunigung für die Berechnung der Energieumsätze Formel 27 benutzt.

Formel 27: Berechnung von Beschleunigungs- und Verzögerungsenergien den Segmenten zwischen den potentiellen Zwangshalten

$$W_{freihalten} = F_w (v_{max\,aktuell}) \frac{v_{max\,aktuell}^2}{a}$$

$$W_{vorhalten} = F_w (v_{max\,nächste}) \frac{v_{max\,nächste}^2}{a}$$

- F_w Fahrwiderstand
- $W_{freihalten}$ Energie die im EDLC einspeicherbar sein sollte
- $V_{max\,aktuell}$ maximale Geschwindigkeit im aktuellen Segment (aus der Statistik)
- $W_{vorhalten}$ Energie die aus dem EDLC entnehmbar sein sollte
- $V_{max\,nächste}$ maximale Geschwindigkeit im nächsten Segment (aus der Statistik)
- a mittlere Beschleunigung bzw. Verzögerung

In der Praxis könnte anstatt der Nutzung von Mittelwerten für die Beschleunigungs- und Verzögerungsenergie, auch aus den Daten der aktuellen Fahrt oder über Daten vorausfahrender Busse eine Einordnung der Fahrt nach Energieumsatz durchgeführt und damit die Annahmen an die aktuellen Werte besser angepasst werden. Die einfachste Methode wäre die Nutzung der aktuellen Geschwindigkeit zur Berechnung der freizuhaltenden Energie, dabei fehlt aber der

Zeithorizont innerhalb dessen eine Aufnahme dieser Energie erforderlich ist. Der zu fahrende **Abstand vom nächsten potentiellen Zwangshalt** bietet eine Information zum Zeithorizont, wenn für die Fahrten uniforme mittlere Geschwindigkeiten in den Segmenten zwischen den Zwangshalten vorausgesetzt werden. Der Abstand zu den potentiellen Zwangshalten kann dann zur Erhöhung oder Senkung der SOC-Grenzen benutzt werden. Eine Anpassung je nach Verkehrslage, abhängig von Wochentag und Uhrzeit, ist möglich.

Bei Vorliegen mehrerer potentieller Zwangshalte innerhalb einer Entfernung von 500 m vor der aktuellen Fahrzeugposition, kommt ein empirisches Verfahren zur Anwendung. Es werden dabei die Abstände über Gewichtungsfaktoren für den Typ und Abstand des potentiellen Zwangshaltes zu Einflussfaktoren für die Nähe bzw. Ferne von den potentiellen Zwangshalten summiert, wie in Formel 28 gezeigt:

Formel 28: Gewichteter Abstand zu den potentiellen Zwangshalten

$$a_{ZH} = \frac{1}{\sum_{i=0}^{n_{ZH}-1} \frac{1}{\frac{Ort_{ZH_i} - Pos_{Fahrz} - \delta x}{Gewicht_{ZH Typ}}}}$$

a_{ZH}	gewichteter Abstand zu potentiellm Zwangshalt
n_{ZH}	Anzahl potentielle Zwangshalte
Ort_{ZH}	Ort des potentiellen Zwangshaltes auf dem Graphen der Fahrstrecke
Pos_{Fahrz}	Position des Fahrzeuges auf dem Graphen der Fahrstrecke
$Gewicht_{ZH Typ}$	Gewicht des jeweiligen Zwangshalttyps
δx	Verschiebung der Zwangshalte in Richtung Fahrzeugposition

Die Gewichtung erfolgt anhand der vermuteten Wahrscheinlichkeit für einen Zwangshalt. Die Entscheidung, welcher Ansatz für den Abstand zum potentiellen Zwangshalt gewählt wird (Ferne, Nähe, Gewichtungsfaktor Energieumsatz), wird der *Monte-Carlo-Variation* überlassen, die die optimale Faktorenkombination für das Kollektiv der betrachteten Fahrten hervorbringt. Es ist dabei auch möglich, bzw. es wird bei der Definition der Stichprobe auch bewusst unterstützt, dass einige Parameter zu Null gesetzt werden.

9.4 IMPLEMENTIERUNG DER SIMULATION DES TAKTISCHEN ENERGIEMANAGEMENTS

9.4.1 DATENMANAGEMENT SIMULATION

Die **Fahrdaten/Fahrkurven** stellen den Ausgangspunkt für die Simulation des Fahrzeugbetriebs dar. Aus ihnen ergeben sich der Leistungsbedarf, die Abstände zu den potentiellen Zwangshalten, aber auch die Prognosen der benötigten bzw. rekuperierbaren Energiemengen. Für die Berechnung der gewünschten SOC-Grenzen der Hystereseregulung wurden die Entfernungen nach Art der potentiellen Zwangshalte gewichtet. Bei der Gewichtung wurden drei Modelle untersucht:

- Betonung normaler Haltestellen
- Betonung aller Haltestellen (auch Doppelhaltestellen)
- Betonung aller Haltestellen und Kurven

Die Betonung der einfachen Haltestellen brachte in einer ersten Simulation dabei das beste Ergebnis und wurde in Folge auch verwendet.

Die **mittleren Energiemengen pro Fahrabschnitt** werden bei der Berechnung der unteren und oberen Grenze des Ladezustandes für die Hystereseregulung genutzt. Die Fahrkurve wird zur Vorberechnung der Antriebs- und Rekuperationsleistungen, der elektrischen Wirkungsgrade

der elektrischen Antriebsmaschine im Motor und Generatorbetrieb benutzt. Die **Wirkungsgrade** wurden dann ebenso, wie die sekundliche **Position** des Fahrzeuges, in einer Liste (Tupel) an die Simulation übergeben. Vor der Simulation werden auch die **optimalen Betriebspunkte** für das VKM-Generator-Modul in Abhängigkeit von EDLC Spannung und Last ermittelt und in einer Matrix gespeichert. Während der Simulation werden die Wirkungsgrade und der Verbrauch aus diesen Matrizen gelesen. Im Hauptteil der Simulation werden auf der Basis dieser Angaben nur die elektrischen Zu- und Abflüsse zum Energiespeicher berechnet und die entsprechenden Verluste im Antriebssystem. Die **Dynamikkorrektur** ist eine nachgelagerte Berechnung, die durchgeführt werden kann, wenn die **Einsatzkurve des Motor-Generator-Satzes** bestimmt wurde. Danach werden auch die **kumulierten Kraftstoffverbräuche** und Emissionen berechnet. Zu Beginn der Simulation hat der Energiespeicher immer den Mittelwert zwischen oberem und unterem nicht modifiziertem Vorgabewert für den Ladezustand. Mit der Differenz zwischen Beginn und Ende der Simulation im Energiespeicher vorhandenen Energiemengen werden der Verbrauch bzw. die Emissionen korrigiert. Zusätzlich werden elektrische Verluste für diese Differenz berücksichtigt.

9.4.2 SIMULATIONSVERFAHREN

Für die Simulation mit Hilfe von *Mathcad* wurde ein rückwärts blickendes (*backward-looking*) Verfahren gewählt. Die quasistatische Simulation ist für die Betrachtung des Energiemanagement ausreichend, weil die Fahrbarkeit durch die Vorgabe einer einzuhaltenden Fahrkurve nicht tangiert wird. Bei einer dynamischen (mikroskopischen) vorwärts schauenden (*forward-looking*) Simulation kämen Problematiken wie die Stabilität der Verfahren hinzu, die zur Lösung der Differenzialgleichungen verwendet werden. Die Verkleinerung der Schrittweite wiederum würde zu Rechenzeiten führen, die ein häufiges Durchrechnen während der Optimierung erschweren würden (212; 213). Es ist beim quasistatischen rückwärts blickende Verfahren jedoch ein Ausscheiden von Fällen nötig, wo im Energiespeicher eine Unterdeckung auftritt. Bei einer dynamischen vorwärts blickenden Simulation wäre es möglich hier die Fahrkurve anzupassen und auch beim Bremsen gegenzusteuern, wenn Energie verworfen werden müsste. Beides wäre jedoch im Hinblick auf die Einhaltung der Fahrzeiten problematisch, und die Algorithmen sowie Leistungsdaten müssten in einer vorwärts blickenden Simulation solange angepasst werden, bis die Fahrzeiten eingehalten werden, wobei dann eine Interaktion mit den Lichtsignalanlagen bzw. dem Verkehr implementiert werden müsste.

9.4.3 IMPLEMENTIERTE MODULATION DER SOC-GRENZEN

Die Korrekturfaktoren für die SOC wurden aus einer Verknüpfung zweier **äußerer Einflüsse** ermittelt:

Tabelle 21: Benutzte äußere Einflüsse für die abstandsabhängige Modifikation der SOC-Grenzen

Abstand bzw. Ferne vom potentiellen Zwangshalt	Energiebilanz für zukünftigen Fahrtabschnitt
<ul style="list-style-type: none"> • Zunahme mit dem Abstand vom potentiellen Zwangshalt • Abnahme mit dem Abstand vom potentiellen Zwangshalt 	<ul style="list-style-type: none"> • Erforderlicher freier Speicher • Erforderliche Antriebsenergie

Zusätzlich zum Einfluss der Abstände zu den potentiellen Zwangshalten wird die Wirkung folgender innerer Einflüsse, also von **Zustandsgrößen**, auf die SOC Grenzen variiert:

Tabelle 22: Benutzte innere Einflüsse für die zustandsabhängige Modifikation der SOC-Grenzen

1. Aktuelle Laufzeit Motor-Generator-Satz
2. Spannungsdifferenz Motor-Generator-Satz (bei optimaler Motor-Generator-Satz Drehzahl) zu EDLC-Spannung
3. Absolutwert der aktuellen elektrischen Nettoleistung zum EDLC (Rekuperation und Motor-Generator-Satz)
4. Aktueller SOC des EDLC

Bei der Nettoleistung wurde testweise auch ein gleitendes Mittel genutzt, diese Variante jedoch wegen schlechterer Ergebnisse verworfen. Für jeden Einfluss wurde zufällig in der MC-Variation ein Wichtungsfaktor bestimmt. Der SOC und die Spannung sagen beide in unterschiedlicher Weise etwas über den Energieinhalt des Energiespeichers aus. Durch die Monte Carlo-Variation ist sichergestellt, dass der bessere Ansatz im Kontext eine höhere Wichtung erfährt. Alle vier gewichteten Einflussgrößen wurden zu einem Korrekturfaktor für die unter und obere SOC-Grenze summiert, wie in Formel 29 gezeigt. Der Nenner wird jeweils zur Normierung der Einflussgrößen benutzt, um die Faktoren dimensionslos zu machen und eine gute Ausgangslage für eine effiziente und effektive Monte Carlo-Variation zu schaffen.

Formel 29: heuristischer Berechnungsansatz für die von Zustandsgrößen abhängige SOC-Korrektur

$$\Delta SOC_{hi/lo} = f_{lauf\ hi/lo} \frac{t_{lauf}}{150\ sec} + f_{\Delta V\ hi/lo} \frac{0,01 \Delta V_{GenS_{EDLC}}}{0,5 U_{nEDLC}} + f_{Pel\ hi/lo} \frac{\Sigma P_{EDLC}}{0,5 (P_{nGenS} + 0,5 P_{nEA})} + f_{SOC\ hi/lo} \frac{W_{Sp}}{0,8 W_{EDLC}}$$

ΔSOC_{hi} ΔSOC_{lo}	absoluter Beitrag zur Modulation der jeweiligen SOC-Grenze
$f_{0\ hi/lo}$	Faktor für den Einfluss der Laufzeit
$f_{1\ hi/lo}$	Faktor für den Einfluss der Spannungsdifferenz
$f_{2\ hi/lo}$	Faktor für den Einfluss der elektrischen Netto-Transferleistung vom/zum EDLC
$f_{3\ hi/lo}$	Faktor für den Einfluss des Energieinhaltes des EDLC
t_{lauf}	aktuelle Laufzeit des Motor-Generator-Satzes seit dem letzten Start
$\Delta V_{GenS_{EDLC}}$	Betrag der Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Motor-Generator-Satz
U_{nEDLC}	Nennspannung EDLC
ΣP_{EDLC}	Nettotransferleistung vom/zum EDLC
P_{nGenS}	Nennleistung Motor-Generator-Satz
P_{nEA}	Nennleistung elektrische Antriebsmaschine
W_{Sp}	aktueller Speicherinhalt EDLC
W_{EDLC}	maximaler Speicherinhalt EDLC

Die so berechnete, absolute Korrektur der SOC-Grenzen wurde bei der Suche nach dem Optimum alternativ zu, sowie auch additiv mit einer vom gewichteten Abstand zu den Zwangshalten abhängigen SOC Korrektur verwendet. Dabei wurden in der MC-Variation abwechselnd positive und negative Einflüsse des gewichteten Abstandes der potentiellen Zwangshalte benutzt, wie in Formel 30 gezeigt:

Formel 30: heuristischer Berechnungsansatz der vom Abstand zu den potentiellen Zwangshalten abhängigen SOC-Grenzen

a) Proportional zur Nähe:

$$SOC_{hi} = SOC_{0\ hi} + \Delta SOC_{hi} f_{\Delta SOC\ hi} + \left(\frac{100\ m}{100\ m + a_{ZH}} f_{SOC\ ZH\ hi} \right) \frac{W_{frei} \vee W_{vorh}}{W_{EDLC}}$$

$$SOC_{lo} = SOC_{0\ lo} + \Delta SOC_{lo} f_{\Delta SOC\ lo} + \left(\frac{100\ m}{100\ m + a_{ZH}} f_{SOC\ ZH\ lo} \right) \frac{W_{frei} \vee W_{vorh}}{W_{EDLC}}$$

b) Proportional zur Ferne:

$$SOC_{hi} = SOC_{0\ hi} + \Delta SOC_{hi} f_{\Delta SOC\ hi} + \left(\left(1 - \frac{100\ m}{100\ m + a_{ZH}} \right) f_{SOC\ ZH\ hi} \right) \frac{W_{frei} \vee W_{vorh}}{W_{EDLC}}$$

$$SOC_{lo} = SOC_{0\ lo} + \Delta SOC_{lo} f_{\Delta SOC\ lo} + \left(\left(1 - \frac{100\ m}{100\ m + a_{ZH}} \right) f_{SOC\ ZH\ lo} \right) \frac{W_{frei} \vee W_{vorh}}{W_{EDLC}}$$

SOC_{hi} SOC_{lo} obere untere Schaltgrenze

$SOC_{0\ hi/lo}$ Basiswert SOC hi = obere und lo = untere Grenze

$\Delta SOC_{hi/lo}$ abstandsunabhängige Korrektur anhand der Zustandsgrößen aus Formel 29

$f_{\Delta SOC\ hi/lo}$ Korrekturfaktor für $\Delta SOC_{hi/lo}$

a_{ZH} gewichteter Abstand von potenziellen Zwangshalten nach Formel 28

$f_{SOC\ ZH\ hi/lo}$ Korrekturfaktor für Abstandsabhängige Korrektur

W_{frei} freizuhaltende Energie im EDLC beim nächsten potenziellen Zwangshalt nach Formel 27

W_{vorh} vorzuhaltende Energie im EDLC nach dem nächsten potenziellen Zwangshalt nach Formel 27

W_{EDLC} maximaler Energieinhalt EDLC

In Abbildung 47 werden anhand eines Fahrtausschnittes verschiedene Varianten gezeigt, wie die Annäherung an die vermuteten Zwangshalte über den Abstand und einen vom Vorzeichen und Höhe her unterschiedlichen Faktor $f_{SOC\ ZH}$ auf die SOC-Grenzen einwirken kann.

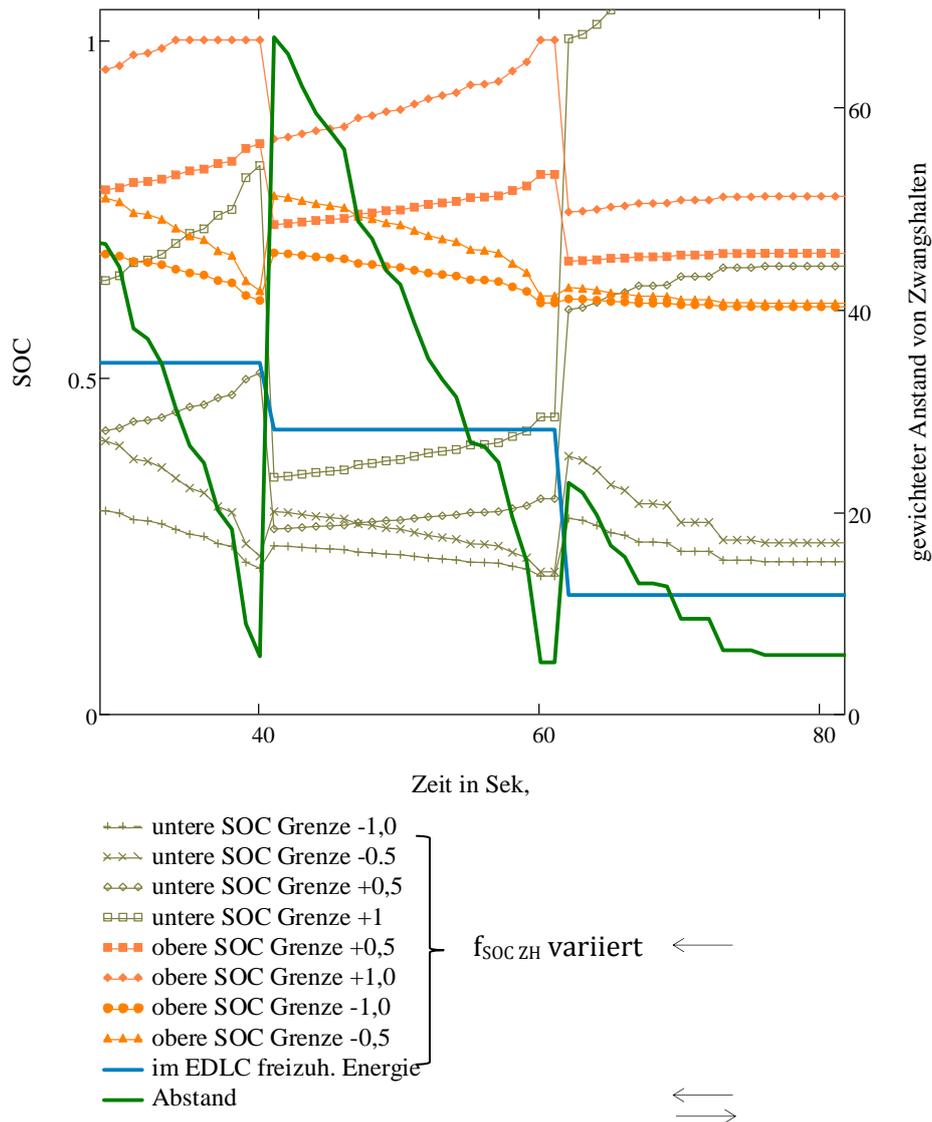


Abbildung 47: Visualisierung der Alternativen bei der Modifikation der SOC-Grenzen für die Hysterese-Regelung, Variation des Korrekturfaktors des Einflusses des Abstandes zum potentiellen Zwangshalt auf den SOC von - 1,0 bis + 1,0

Zusätzlich zum Einfluss der gewichteten Abstände zu den Zwangshalten, der mit dem erwarteten Energieumsatz im Segment korrigiert wird, werden noch die Einflüsse der Zustandsfaktoren für eine Korrektur der Schaltgrenzen benutzt. Die Terme, die vom Abstandseinfluss herrühren, und die Terme, die den Einfluss der Zustandsfaktoren wiedergeben, werden bei der Berechnung der SOC-Korrekturen additiv zusammengeführt, wie in Abbildung 48 gezeigt.

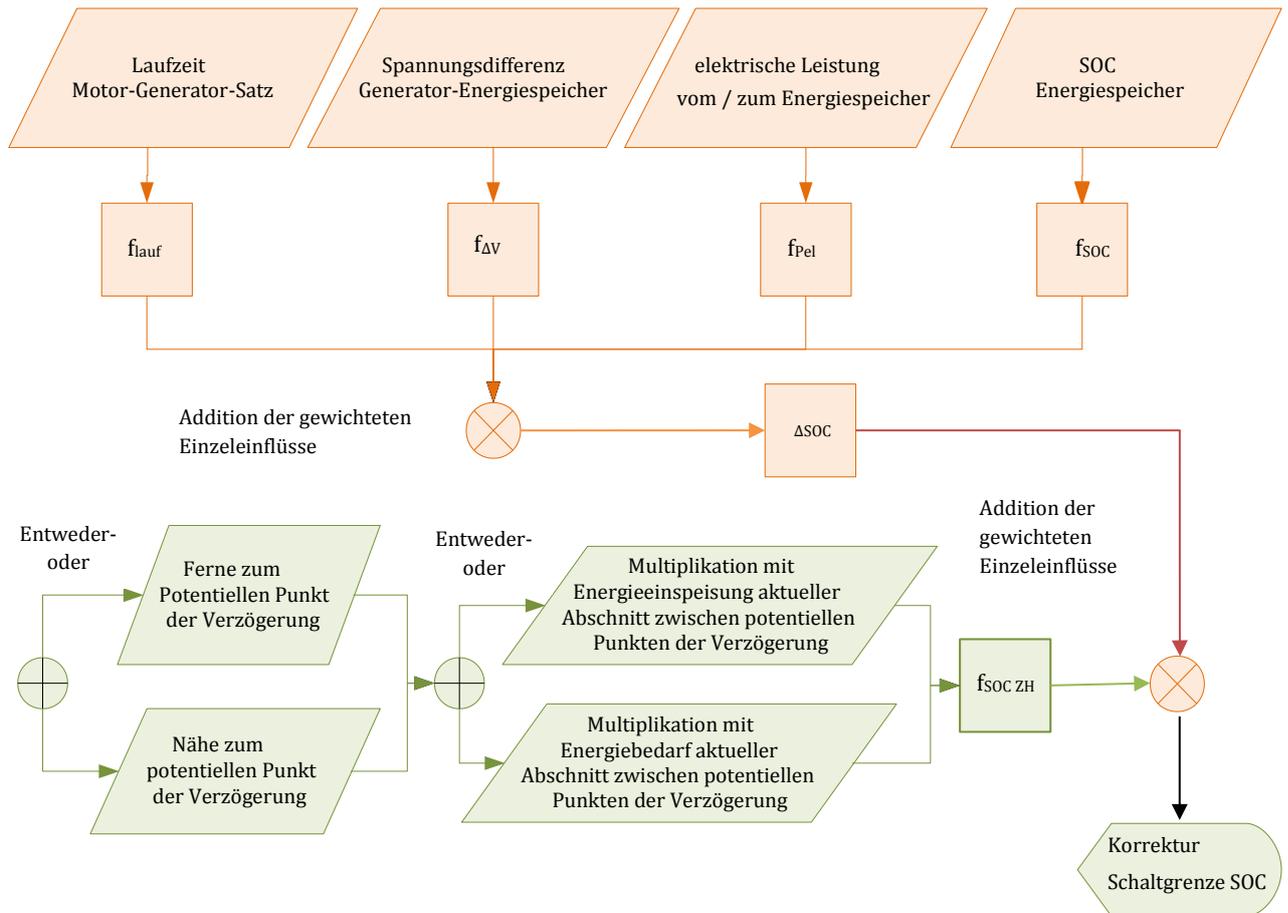


Abbildung 48 Zusammenführung der Einflüsse nach Formel 29 und Formel 30 zu einem heuristischen Algorithmus für die SOC-Korrektur beim strategischen Energiemanagement.

Die zweckmäßige Höhe der Einflussfaktoren f wird in Kap. 10 besprochen. Der auf Zufallsprinzipien beruhenden Untersuchung mittels der *Monte-Carlo* Variation überlagert wurde eine faktorisierte Tabelle mit den kombinatorischen Lösungen, ob Nähe oder Ferne zu berücksichtigen sind. Aus dieser wurde bei der Erstellung der Parametersätze für die MC-Simulation zufällig gezogen. Den faktorisierten Einfluss zweier Alternativen bei der Berücksichtigung des Abstandes zu potentiellen Zwangshalten auf drei SOC-Grenzen zeigt Tabelle 23:

Tabelle 23: Faktorisierte Lösung für drei Variablen mit zwei Ebenen (Nähe und Ferne zum potentiellen Zwangshalt Variante a) nach Formel 30 grün, b) rot)

Kombination	Untere SOC-Grenze nach Formel 30	Mittlere SOC-Grenze nach Formel 30	Obere SOC Grenze nach Formel 30
1	Nähe	Nähe	Nähe
2	Nähe	Nähe	Ferne
3	Nähe	Ferne	Nähe
4	Nähe	Ferne	Ferne
5	Ferne	Nähe	Nähe
6	Ferne	Nähe	Ferne
7	Ferne	Ferne	Nähe
8	Ferne	Ferne	Ferne

Zusätzlich zur Auswahl, ob Nähe oder Ferne bei der Modulation der SOC berücksichtigt werden sollen, wurde auch eine variable Verkürzung des vorgewichteten Abstandes untersucht, da ja die Rekuperation beim Zwangshalt selbst bereits zu Ende ist und die Information über den nahenden Zwangshalt ggf. früher benötigt würde (siehe Abbildung 83). Die Berücksichtigung einer **Toleranz bei der Positionsbestimmung** entspricht einer positiven oder negativen Verschiebung der Fahrzeugposition relativ zu den potentiellen Zwangshalten. Dies muss vor der eigentlichen Simulation des taktischen Energiemanagements berechnet werden.

9.4.4 ABLAUF DER OPTIMIERUNG MIT EINSATZ DER MONTE-CARLO SIMULATION

Im gegenständlichen Falle wird die *Monte-Carlo* Methode als stochastische Suchtechnik genutzt um die Einflussfaktoren zu bestimmen, die mit einem im Vergleich zur Lösung mittels DP relativ einfachen Algorithmus eine **annähernd optimale globale Lösung** für ein mehrdimensionales Problem liefern. Das Optimum ist hier der minimale Verbrauch (könnte auch Emission sein) und die Lösung ein Satz von Parametern. Hier hilft der *Monte-Carlo* Ansatz auch dann weiter, wenn andere Verfahren in lokalen Minima stecken bleiben würden. Für die Praxis ist es wichtig dass die gefundene Lösung robust ist, d. h. auch bei anderen Fahrten mit den gefundenen Parametern eine gute Lösung präsentiert werden kann. Dieser Beweis wird über die Übertragung der Ergebnisse in Kap. 11.2.3 geführt.

Mit Hilfe der *Monte-Carlo* Variation wurden die Faktoren für die Berücksichtigung der Einflüsse im taktischen Energiemanagement variiert und die Simulation mit jedem Parametersatz für die Fahrtdaten durchgeführt. Die Einflussfaktoren wurden bei der Faktorisierung und gemeinsamen Variation **gleichverteilt** zwischen einer vorgegebenen oberen und unteren Grenze mithilfe des in *Mathcad* eingebauten *uniform random number generators* ermittelt. Diese Vorberechnung der Einflussfaktoren kann als „Arbeitspferd“ der *Monte-Carlo* Methode bezeichnet werden (214). Die MC-Simulation erfordert danach zwar eine hohe Rechenleistung bei der Simulation, kann aber durch die hohe Zahl von Ergebnissen auch statistische Aussagen für die Analyse liefern.

Als Nachteil der *Monte-Carlo* (MC-)Variation der Faktoren für den Einfluss auf die Schaltgrenzen der Hysterese-Regelung kann die benötigte Rechenleistung gesehen werden. Bei der Sensibilitätsanalyse wurde, bei Nutzung desselben Simulationskerns, eine Liste mit aufsteigenden Zahlen für die Einflussfaktoren verwendet um die Rechenzeit zu verkürzen. Der hohe rechentechnische Aufwand der *Monte-Carlo*-Variation fällt bei den theoretischen Untersuchungen und die Voroptimierung an. Daneben wird die maximale Zahl an berechneten Varianten durch Speicherbeschränkungen begrenzt, wenn Simulationsergebnisse für jeden Zeitschritt gespeichert werden. Die Kosten und Aufwände für die rechnerische Implementierung des taktischen Energiemanagements in den Fahrzeugen hingegen, sind aber infolge der genutzten Algorithmen gering.

Die Problemstellung des taktischen Energiemanagements wird in drei Schritte unterteilt. Zuerst wird für die Bestimmung der Zielgröße ein Modell geschaffen. Dann werden mit diesem Modell in einem zweiten Schritt die Parameter für eine Regelung gesucht, die den Zielwert in weiterer Folge ohne Inanspruchnahme des Modelles im Betrieb minimieren helfen. Mit zusätzlichen Fahrkurven ist das Ergebnis aber auch theoretisch mithilfe des Modells überprüfbar.

Die MC-Variation kann noch zwei Informatik-Funktionen erfüllen. Durch die vorgegebene Liste der Zufallszahlen könnten mehrere Simulationen parallel ablaufen. Die Rechenzeit lässt sich dadurch verkürzen. Eine Portierung auf eine *Mathcad* Version die diese Parallelisierung unterstützt ist durch Aufwärts-Inkompatibilitäten nicht möglich. Daher wurden MC-Simulationen mit maximal 200.000 Varianten gerechnet. Einschränkungen auf die Berechnung

von 50.000 Varianten waren nötig, wenn Ergebnisse für jeden Zeitpunkt der Fahrt abgespeichert wurden.

9.4.5 EINGRENZUNG DES ZULÄSSIGEN LÖSUNGSRAUMS BEI DER MC-SIMULATION

Zur Verringerung des Speicherbedarfs wurden solche Ergebnisse vor dem Abspeichern verworfen, die folgende Vorgaben nicht erfüllen:

- Defizit in Bezug auf die Antriebsenergie, weil der EDLC nicht ausreichend aufgeladen wurde.
- Anzahl der Starts des Motor-Generator-Satzes größer 120
- Differenz zwischen EDLC Ladezustand vor und nach der Fahrt größer als 30 % des maximalen Energieinhaltes des EDLC.

Ein Defizit bei der Speisung des Antriebes aus dem EDLC definiert ebenso einen ungültigen Lösungsversuch. Ein sehr häufiges Anspringen des Motor-Generator-Satzes führt zu zwei Problemen.

- die Zahl der Starts wird die **Standzeit** der VKM nur geringfügig verringern, weil die thermische Trägheit des Motors den Schaden im Vergleich zu einem Kaltstart begrenzt.
- sehr häufige Starts könnten negative **psychoakustische Folgen** bei den Fahrgästen verursachen.

Wegen der leisen elektrisch gefahrenen Perioden empfinden ca. 22 % der Fahrgäste einen Hybridbus als lauter (215). Eine sehr häufiges Anspringen könnte die Fahrgäste durch häufigere Wechsel der Lautstärke noch weiter irritieren, daher werden zusätzlich zur Berücksichtigung des für das Hochfahren erforderlichen Energie, Varianten mit einer höheren Zahl von Motor-Generator-Satz-Starts verworfen.

Die **Energiedifferenz im EDLC** zwischen Fahrtbeginn (50 % SOC) und beim Ende der Fahrt wird beim Kraftstoffbedarf zusätzlich mit den indirekten Folgen des Energieumsatzes im Hinblick auf die Verluste im EDLC korrigiert- Sicherheitshalber werden Lösungen ab einer Höhe von mehr als 30 % des maximalen Energieinhaltes des EDLC ausgeschieden, nicht nur weil der Ausgleichrechnung weniger vertraut werden muss, sondern weil es für die nachfolgenden Fahrtabschnitte zu gravierenden Änderungen kommen kann, hin bis zur Unterdeckung oder dem Verwerfen von rekuperierbarer Verzögerungsenergie.

Nicht als selbständiges Kriterium wird die **verworfenen nicht rekuperierte Bremsenergie** gesehen, da diese in der Praxis in Wärme umgewandelt wird, und sich dieser Verlust ja ohnehin im Verbrauch bemerkbar macht und damit ein Verwerfen von rekuperierbarer Energie ohnehin im *Monte-Carlo-Ansatz*, der die sparsamsten Lösungen ermittelt, sichtbar wird. Aus speicher-technischen Gründen wurden bei der MC-Variation Lösungen mit höheren verworfenen Energiemengen jedoch ausgeschieden.

10 EINFLUSSANALYSE DURCH VARIATION EINZELNER PARAMETER BZW. VON PARAMETERGRUPPEN

10.1 EINLEITUNG

Das folgende Kapitel benutzt die in Kap. 8 definierte Simulationsumgebung um das Wissen über die in Kap. 9 beschriebenen Ansätze für die Modulierung der SOC-Grenzen der Hysterese-regelung zu vertiefen und die MC-Simulation zu verbessern. Im ersten Teil des Kapitels werden einzelne, vom Abstand zu potentiellen Zwangshalten unabhängige Einflussfaktoren variiert. Im zweiten Teil des Kapitels wird die Kombination einzelner Faktorengruppen analysiert und zuletzt die Kombination aller Einflüsse. Damit werden die Grundlagen für einen integrierten Ansatz für das taktische Energiemanagement aufbereitet, wie er in Kap. 11 vorgestellt und untersucht wird.

10.2 SENSIBILITÄTSANALYSE: ERGEBNISSE DER VARIATION EINZELNER ZUSTANDSGRÖßEN ZUR MODULATION DER SOC-SCHALTGRENZEN

Bei den Algorithmen der taktischen Regelung des Motor-Generator-Satzes können neben den Abständen zu potentiellen Zwangshalten auch **Zustandsgrößen**, wie in Formel 29 gezeigt, genutzt werden, um die obere und untere (sowie ev. die mittlere) SOC-Grenze zu beeinflussen. Vor der MC-Variation aller Einflussfaktoren gemeinsam, wird hier die Korrelation zwischen Einflussfaktor für einzelne Zustandsgrößen und dem Verbrauch geprüft, wobei dabei die übrigen Einflussfaktoren zu Null gestellt und damit andere Einflüsse ausgeschaltet wurden und der Abstand zu den potentiellen Zwangshalten ebenso unberücksichtigt blieb.

Über die Variation der Einzelergebnisse kann die Sensibilität des Einzeleinflusses erkannt werden. Zusätzlich können damit bei der *Monte-Carlo*-Variation die Grenzen der gleichverteilten Zufallsverteilung der Einflussfaktoren für die verschiedenen Zustandsgrößen richtig festgelegt werden.

Da in der ersten Phase der Analyse der Effekt der Einflussfaktoren noch nicht bekannt ist, werden die Faktoren hier bei jedem Einfluss in einem sehr weiten und für alle Einflüsse identen Bereich variiert, um auszuschließen, dass interessante Bereiche bei der Analyse ausgeblendet werden. Die Einflussfaktoren werden anhand Formel 29 in jedem Zeitschritt der Simulation mit dem jeweiligen Zustandsfaktor multipliziert und die SOC-Grenze um das Ergebnis der Multiplikation verändert (moduliert). Die folgenden Analysen folgen demselben Schema: Zuerst werden die Ergebnisse (Verbrauch und elektrische Verluste) der Variation der Einflussfaktoren aus Formel 29 gezeigt, die Einflüsse erläutert und in Folge die resultierenden SOC-Grenzen dargestellt um die beschriebenen Effekte erklären zu können.

Ungültige Fälle, wo der Fahrkurve nicht gefolgt werden kann, sind unerwünscht, daher wird auch das Energiedefizit (Fehlmenge) in den Grafiken aufgetragen. Es werden durch die Variationsbreite der Einflussfaktoren auch Ergebnisse mit sehr hohen Verbräuchen sichtbar, weil rekuperierbare Bremsenergie nicht gespeichert werden kann. Die in den Diagrammen dargestellten elektrischen Verluste umfassen eine Teilmenge der Summe der Verluste, die sich auf den Kraftstoffverbrauch auswirken. Der Wirkungsgrad der VKM hat ebenfalls einen großen Einfluss, ebenso wie die Ausnutzung der theoretisch rekuperierbaren Verzögerungsenergie. Eine gute Ausnutzung erhöht zwar die elektrischen Verluste, wird aber durch die gesteigerte Rekuperation dennoch zu einem effizienteren Betrieb führen.

10.2.1 EINFLUSS DER LAUFZEIT AUF DIE SOC-KORREKTUR

Einfluss Laufzeit auf SOC_{max}

Die Laufzeit des Generatorsatzes (Motor-Generator-Satz) ist eine leicht erfassbare Größe, die dazu genutzt werden kann die SOC-Grenzen der Hystereseregulung zu beeinflussen. Hier wurde der Einflussfaktor f_{lauf} , mit dem in Formel 29 die Laufzeit bei der Modulation des SOC_{max} multipliziert wird, von +2 bis -2 variiert. Zwischen der Laufzeit und dem zusätzlichen Energieaufwand für häufige Starts des Motor-Generator-Satzes besteht ein direkter Zusammenhang. Lange Laufzeiten werden aber auch durch einen hohen maximalen SOC bewirkt, wodurch die Rekuperation begrenzt wird. Abbildung 49 zeigt bei großen positiven Faktoren für den Einfluss der Laufzeit auf den SOC_{max} keine Veränderung für die Verbrauchssumme für neun Fahrten, während für einen Einflussfaktor f_{lauf} von ca. 0,07 ein Verbrauchsminimum auftritt. Darunter und bei negativen Einflussfaktoren f_{lauf} , womit eine lange Laufzeit das obere SOC verringert, steigt der Verbrauch stark an.

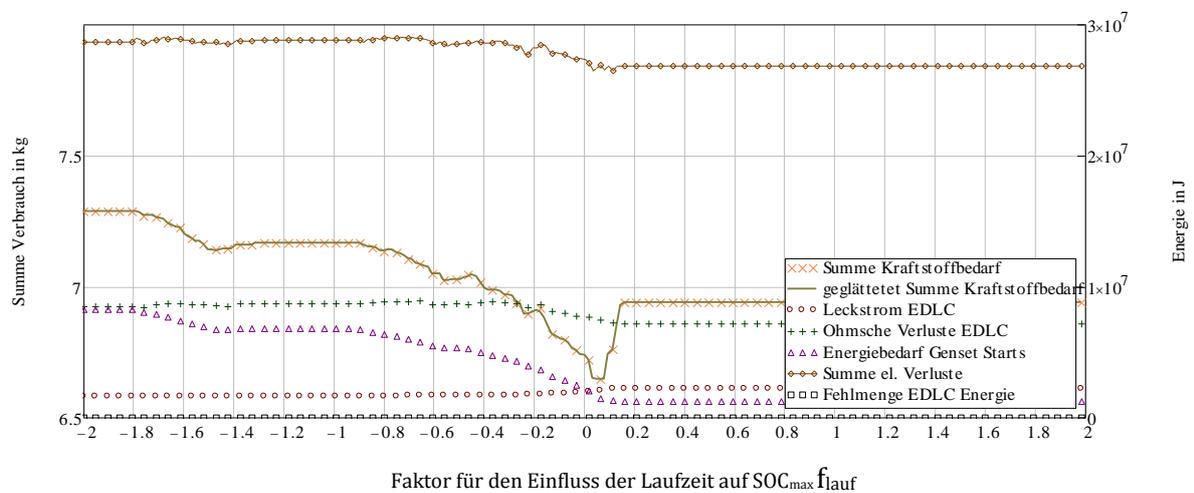


Abbildung 49: Kraftstoffverbrauchssumme bei Variation des Faktors für den Einfluss der Laufzeit des Motor-Generator-Satzes auf die Modulation des SOC_{max}

Für die Ursachenanalyse wurde die Veränderung des SOC-Grenzen der Hystereseregulung, im speziellen der durch den Einflussfaktor f_{lauf} modulierten SOC-Grenze, in Abbildung 50 über den Einflussfaktor dargestellt. Die anderen SOC-Grenzen sind für die Analyse notwendig, und wurden, obwohl sie konstant gehalten werden, ebenso eingezeichnet. Da für die Analyse mehrere Fahrten simuliert wurden, wird für die modulierte obere SOC-Grenze ihr Schwankungsbereich bei den simulierten 9 Fahrten (siehe Kap. 8.2) angegeben.

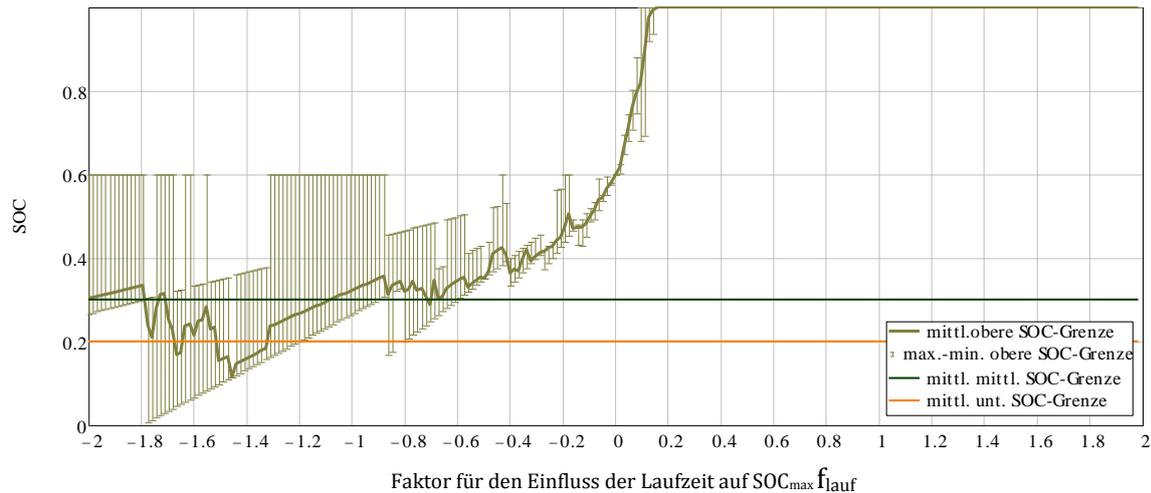


Abbildung 50 SOC-Grenzen bei Variation des Faktors für den Einfluss der Laufzeit des Motor-Generator-Satzes auf die Modulation des SOC_{max}

Rechts vom Verbrauchsminimum steigt in Abbildung 50 die mittlere obere SOC-Grenze SOC_{max} stark an, wodurch der Hysterese-Regler seine Aufgabe nicht mehr wahrnehmen kann. Gleiches gilt für den Bereich des Einflussfaktors kleiner Null, wo der SOC_{max} die mittlere SOC-Grenze erreicht und dann sich dem Wert des SOC_{min} nähert, bzw. diesen sogar unterschreitet. Durch einen optimalen Einflussfaktor werden über Formel 29 Werte für das SOC_{max} , eingestellt, die nahe den Standardwerten der Hystereseregulierung liegen

Beim Minimum für den Verbrauch, trifft nach Abbildung 49 ein sinkender Energiebedarf für die Starts des Motor-Generator-Satzes (hervorgerufen durch weniger Starts) mit sinkenden Ohmschen Verlusten (durch geringere Nettoleistungen vom/zum EDLC) zusammen, bei leicht steigendem Leakagestrom (durch höheren Spannungen im EDLC). Es ist nach diesen Ergebnissen wahrscheinlich, dass der SOC_{max} mit der Laufzeit etwas steigen soll, wobei allerdings der Einfluss nicht zu hoch sein sollte, um eine wirksame Hystereseregulierung nicht zu gefährden.

Einfluss Laufzeit auf SOC_{min}

Der Bei Variation des Einflusses der Laufzeit des Motor-Generator-Satzes auf den SOC_{min} (f_{lauf} in Formel 29), existiert für die Verbrauchssumme über alle Fahrten, wie in Abbildung 51 gezeigt, ein Minimum unterhalb eines Einflussfaktors f_{lauf} von ca. 0,1. Unter einem Einflussfaktor für die Laufzeit auf die Modulation des SOC_{min} von Null ist kein Einfluss zu sehen. D. h. es soll die obere SOC-Grenze mit steigender Laufzeit etwas angehoben werden. Ein über die Laufzeit als Parameter erhöhte untere SOC-Grenze führt zu häufigeren Starts des Motor-Generator-Satzes. Das Laden des EDLC geschieht dabei aber im Mittel bei höheren Spannungen des EDLC, womit theoretische die Ströme und damit auch die Ohmschen Verluste sinken.

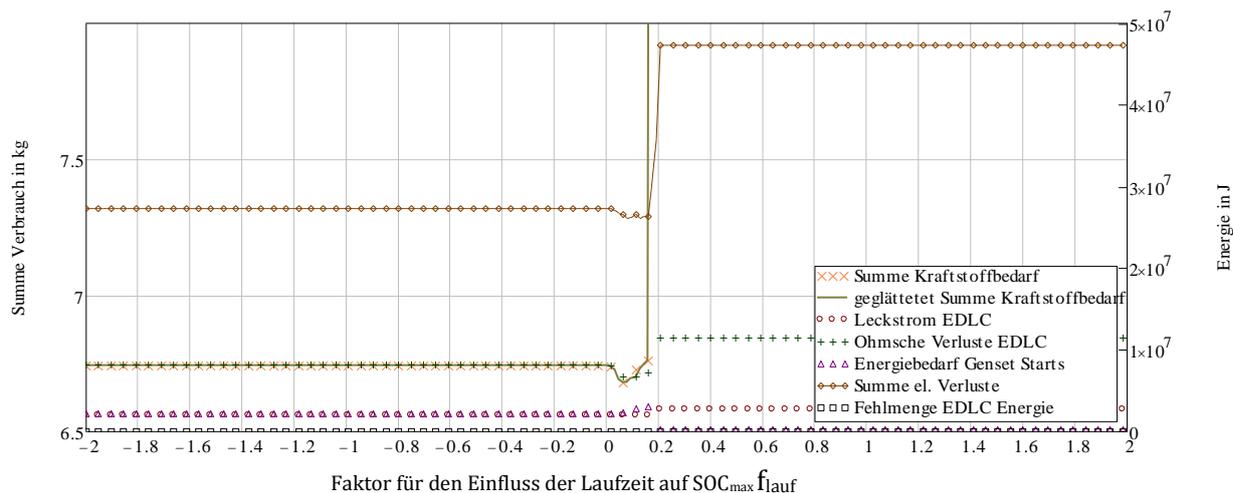


Abbildung 51: Kraftstoffverbrauch bei Variation des Faktors für den Einfluss der Laufzeit des Motor-Generator-Satzes auf die Korrektur des SOC_{min}

Das Verbrauchsminimum korreliert mit geringen Ohmschen Verlusten, die das leichte Ansteigen des Leckagestroms und der Startenergie für den Motor-Generator-Satz überkompensieren. Die Erklärung des Verlaufes des Verbrauchs über den Einflussfaktor kann wieder die Darstellung der durch den Einflussfaktor f_{lauf} veränderten SOC-Grenzen der Hystereseregulierung liefern. Über einem Einflussfaktor f_{lauf} von ca. 0,15 versagt die Regelung durch ein zu hohes SOC_{min}. Unterhalb eines Einflussfaktors f_{lauf} von ca. -0,1 wird der SOC_{min} im Simulationskern auf 0,1 limitiert um eine Mindest-Energie für das Anfahren vorhalten zu können. Mit dem konstanten SOC_{min} sind aber die Simulationsergebnisse ident. Daher bleiben hier der Verbrauch und die Verluste konstant.

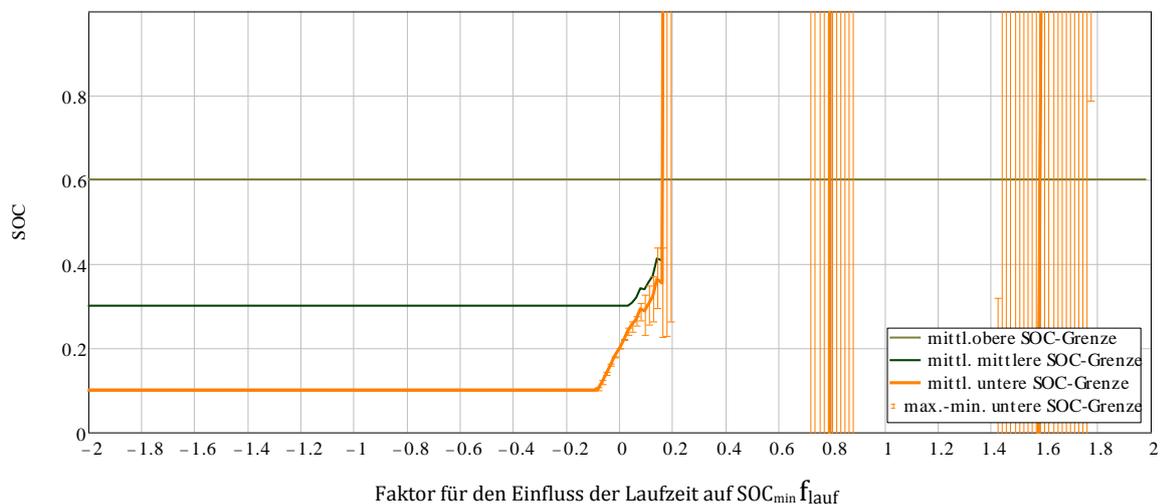


Abbildung 52 SOC-Grenzen bei Variation des Faktors für den Einfluss der Laufzeit des Motor-Generator-Satzes auf die Modulation des SOC_{min}

Der Faktor für den Einfluss der Laufzeit auf den SOC_{min} f_{lauf} hat, wie Abbildung 51 zeigt, ebenso wie beim Einfluss auf den SOC_{max}, nur einen kleinen Bereich, wo er sich positiv auf das Ergebnis auswirkt. Der Einfluss der Laufzeit des Motor-Generator-Satzes auf den SOC_{min} ist also sehr sensibel und kann die Hystereseregulierung schnell außer Betrieb setzen. Ein kleiner positiver Faktor für den Einfluss der Laufzeit auf den SOC_{min} f_{lauf} bringt das beste Ergebnis.

10.2.2 EINFLUSS DER SPANNUNGSDIFFERENZ AUF DIE SOC-KORREKTUR

Einfluss Spannungsdifferenz auf SOC_{max}

Eine hohe Spannungsdifferenz zwischen der aktuellen EDLC-Spannung und der Spannung bei der optimalen Betriebsdrehzahl des Motor-Generator-Satzes führt zu etwas höheren Verlusten im Hochsetz-Tiefsetz-Steller. Indirekt werden auch die Ströme größer, wenn die Spannung im EDLC niedriger als die des Motor-Generator-Satzes ist. Durch die Anhebung der oberen SOC-Grenze steigt die Spannung und die Ohmschen Verluste sinken. Der Faktor für den Einfluss der Spannungsdifferenz auf die obere SOC-Grenze ($f_{\Delta V}$ in Formel 29) wurde für die Sensibilitätsanalyse von +2 bis -2 variiert. Das in Abbildung 53 sichtbare Verbrauchsminimum liegt bei einem Einflussfaktor für die Modulation des SOC_{max} $f_{\Delta V}$ von ca. +0,2 bis +0,3. Über einem Einflussfaktor $f_{\Delta V}$ von ca. 0,4 ist kein Einfluss sichtbar, da das resultierende SOC_{max} zu hoch wird (siehe Abbildung 54). Das Verbrauchsminimum wird durch eine geringere Startenergie für den Motor-Generator-Satz begleitet, und durch ein leichtes Absinken der Ohmschen Verluste überlagert. Der gleichzeitig im Bereich des Minimums ansteigende Leckagestrom (Leckstrom) des EDLC kompensiert diese geringeren Verluste nicht, wodurch sich ein Optimum für den Verbrauch einstellen kann.

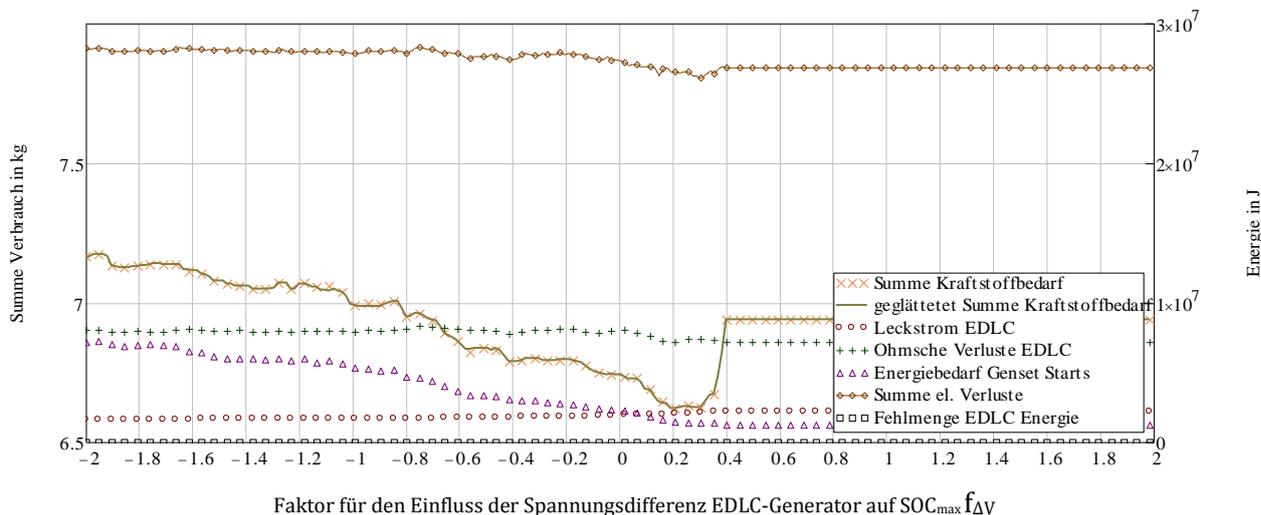


Abbildung 53: Kraftstoffverbrauchssumme bei Variation des Faktors für den Einfluss der Spannungsdifferenz zwischen EDLC-Generator auf die Modulation des SOC_{max}

Auch hier spielt die Lage des mittleren SOC_{max} die entscheidende Rolle für das Verbrauchsminimum. Eine Zusammenschau von Abbildung 54 und Abbildung 53 zeigt, dass ein Einflussfaktor $f_{\Delta V}$ für den Einfluss der Spannungsdifferenz günstig ist, wo das SOC_{max} über 0,6 und unter 0,8 bleibt. Die obere Grenze für das SOC_{max} erlaubt ein Einspeichern von Verzögerungsenergie, die untere verhindert Verluste durch zu häufigere Starts des Motor-Generator-Satzes.

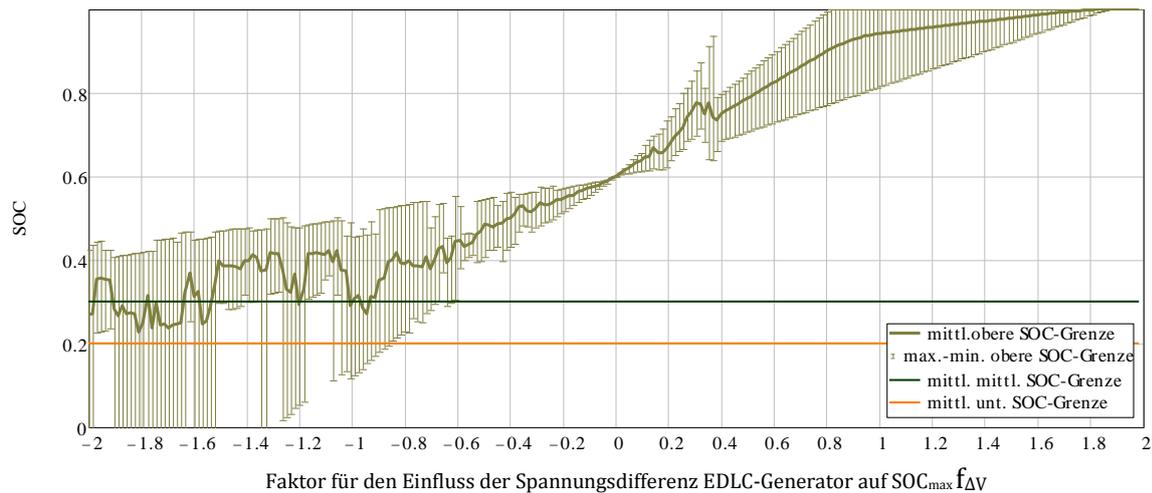


Abbildung 54 SOC-Grenzen bei Variation des Faktors für den Einfluss der Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Generator auf die Modulation des SOC_{max}

Der Faktor $f_{\Delta V}$ für den Einfluss der Spannungsdifferenz EDLC-Generator auf die Modulation des SOC_{max} erzeugt nach Abbildung 53 ein Verbrauchsoptimum bei geringfügig positiven Werten des Einflussfaktors. Der Verbrauchsanstieg bei geringfügig negativen Werten für den Einflussfaktor $f_{\Delta V}$ ist jedoch sanft, weil mit Ansteigen des Einflussfaktors der Leckagestrom sinkt, d. h. der Ladezustand im Mittel geringer ist.

Einfluss Spannungsdifferenz auf SOC_{min}

Auch bei Anhebung der unteren SOC-Grenze steigen die mittleren Spannungen im EDLC. Dadurch sinken die Ohmschen Verluste. Beim Einfluss der Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Spannung bei optimaler Betriebsdrehzahl des Motor-Generator-Satzes auf den SOC_{min} ($f_{\Delta V}$ in Formel 29) ist bei einem Einflussfaktor von unter 0,5 keine Auswirkung zu sehen. Ein in Abbildung 53 gut sichtbares Verbrauchsminimum tritt bei einem Einflussfaktor für $f_{\Delta V}$ von ca. 0,6 auf, rechts daneben findet sich ein Zwischenmaximum bei dem die Zahl der Starts des Motor-Generator-Satzes und der damit verbundene Energieaufwand wieder ansteigt. Die Bei einem Einflussfaktor $f_{\Delta V} > 0,7$ steigt der Verbrauch weiter sehr stark an, da das aus dem Einfluss der Spannungsdifferenz resultierende mittlere SOC_{min} stark ansteigt – wie Abbildung 56 zeigt.

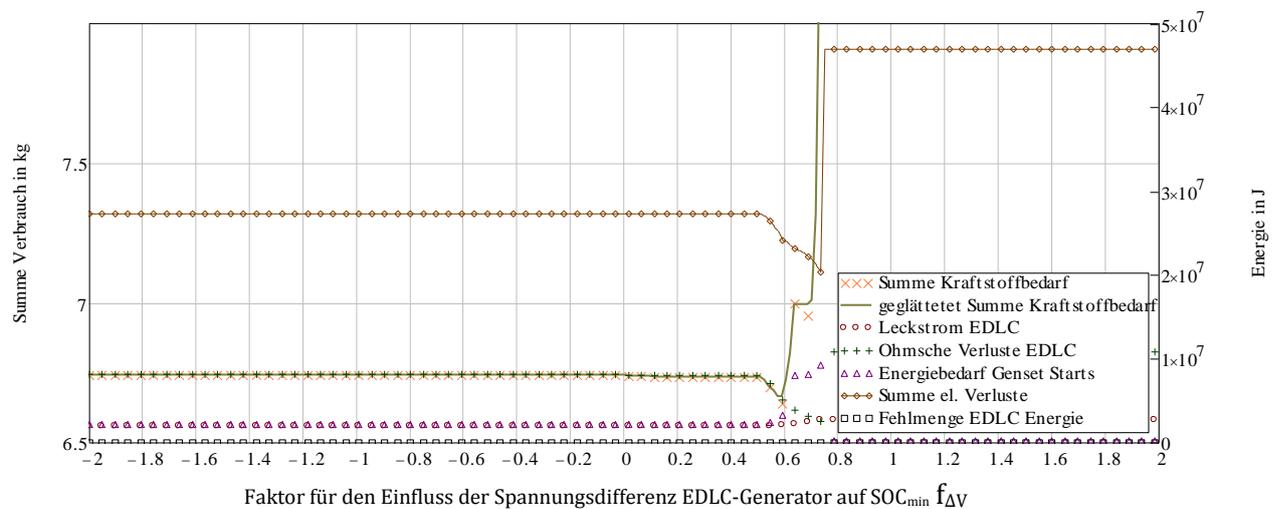


Abbildung 55: Kraftstoffverbrauchssumme bei Variation des Faktors für den Einfluss der Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Generator auf die Modulation des SOC_{min}

Beim Verbrauchsminimum trifft ein steigender Leckageverlust mit sinkenden Ohmschen Verlusten zusammen und die elektrischen Verluste nehmen in Summe ab. Eine Konsequenz aus dem Ergebnis in Abbildung 56 ist, dass der Einfluss der Spannungsdifferenz EDLC-Motor-Generator-Satz auf die untere SOC Grenze sehr sensibel ist. Wie in Abbildung 56 ersichtlich, steigt mit zunehmendem Einflussfaktor $f_{\Delta V}$ sowohl die mittlere als auch die untere SOC-Grenze, die beide gemeinsam durch die Einflussfaktoren moduliert werden. Das Verbrauchsminimum liegt in einem Bereich, wo diese beiden SOC-Grenzen noch einen Abstand von mindestens 0,1 zum Wert für die obere SOC-Grenze haben und somit eine Hystereseregulierung ermöglichen.

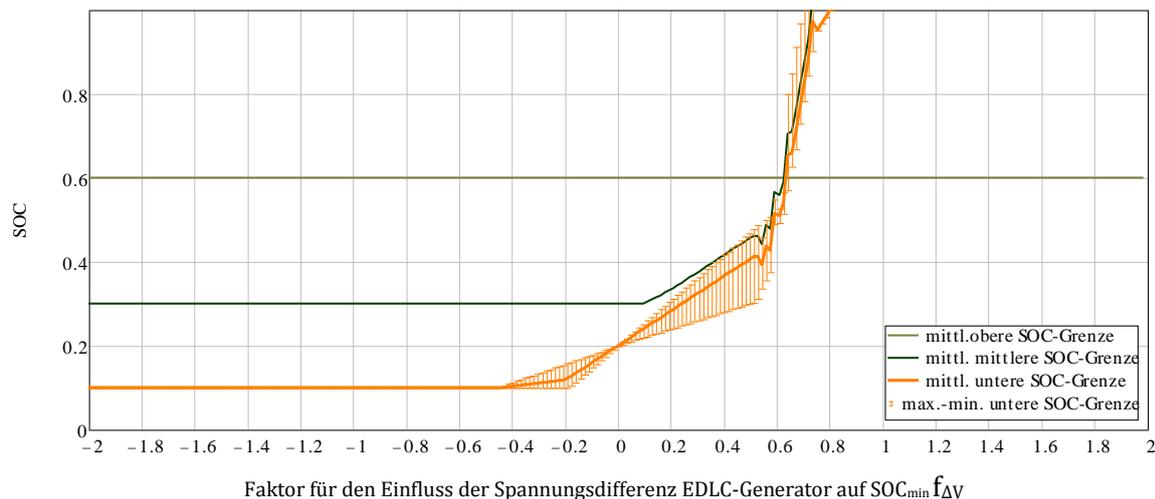


Abbildung 56 SOC-Grenzen bei Variation des Faktors für den Einfluss der Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Generator auf die Modulation des SOC_{min}

Unterhalb eines Einflussfaktors $f_{\Delta V}$ von -0,4 wird der SOC_{min} auf 0,1 limitiert, um eine Mindest-Energie für das Anfahren bereitzuhalten. Dadurch bleibt das Ergebnis konstant. Es kann mit diesem Ergebnis angenommen werden, dass der SOC_{min} mit zunehmender Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Generator gemäßigt steigen soll.

10.2.3 EINFLUSS DER ELEKTRISCHEN NETTOLEISTUNG ZUM EDLC AUF DIE SOC-KORREKTUR

Einfluss elektrische Nettoleistung zum EDLC auf SOC_{max}

Eine hohe elektrische Nettoleistung erhöht zwar direkt die Ohmschen Verluste, entscheidend ist jedoch das Spannungsniveau. Sinkt die obere SOC-Grenze, sind mehr Starts des Motor-Generator-Satzes erforderlich und der Energiebedarf durch die Starts steigt. Die Variation des Einflussfaktors für den Einfluss des Stromflusses zum/vom EDLC auf den SOC_{max} von -2 bis +2 nach (f_{pel} nach Formel 29) zeigt Abbildung 57. Hier ist zu beachten, dass die Verluste vom Vorzeichen des Stroms unabhängig sind. D. h. sowohl bei höheren Speiseströmen (extrem beim Zusammentreffen von Generatoreinspeisung und Rekuperation) in den EDLC als auch bei höheren Entladeströmen (bei allen Varianten gleich, weil nur von der Fahrkurve abhängig) wird durch den Einflussfaktor f_{pel} das SOC moduliert. Der Verlauf des Verbrauchs hat eine breitere Delle rund um den Wert für f_{pel} von +0,2. Bei höheren positiven Einflussfaktoren f_{pel} ist der Einfluss auf den Verbrauch gering.

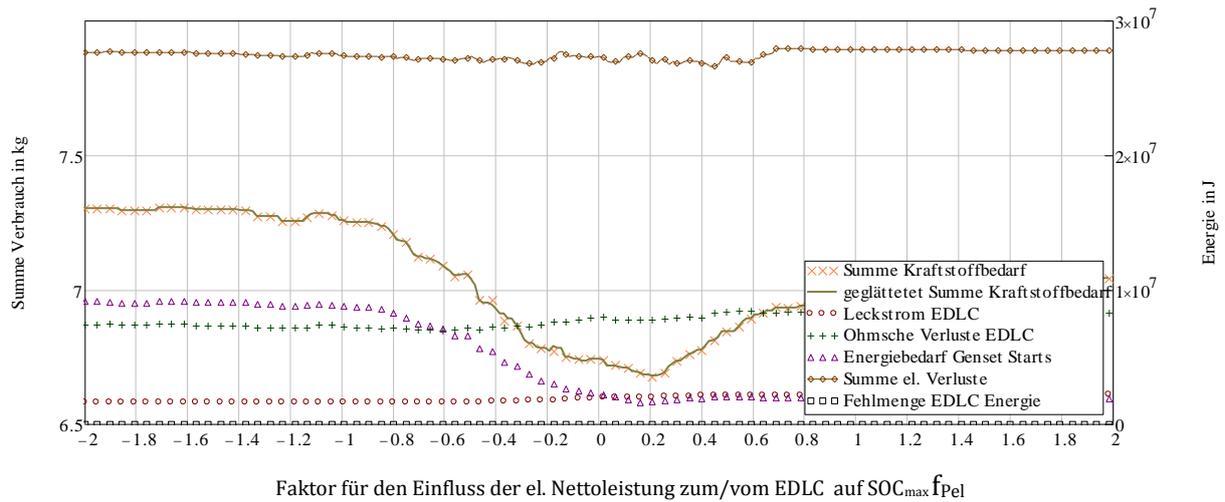


Abbildung 57: Kraftstoffverbrauchssumme und Faktor für den Einfluss der elektrischen Nettogleistung vom/zum EDLC auf die Modulation des SOC_{max}

Beim Verbrauchsminimum trifft ein stark sinkender Energiebedarf für die Starts des Motor-Generator-Satzes mit leicht steigenden Ohmschen Verlusten zusammen, bei leicht steigendem Leckagestrom des EDLC. Der Einfluss der Änderung des Einflussfaktors f_{PeI} auf den mittleren SOC_{max} wird in Abbildung 58 gezeigt. Das Verbrauchsoptimum liegt bei einem mittleren SOC_{max} von ca. 0,6, wobei in diesem Bereich auch die Schwankungsbreite des SOC_{max} gering ist. Außerhalb des Verbrauchsoptimums schwankt der SOC_{max} stark, nach unten oder oben, sodass diesem Effekt das Versagen der Hystereseregulierung und der erhöhte Verbrauch zugeschrieben werden kann.

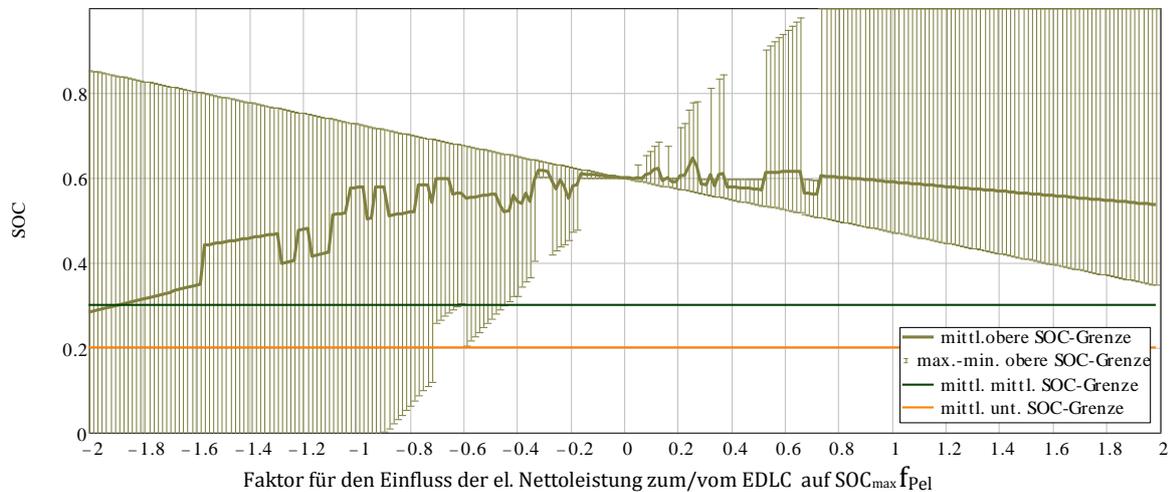


Abbildung 58 Veränderung der SOC bei Variation des Faktors für den Einfluss der elektrischen Nettogleistung zum EDLC auf die Modulation des SOC_{max}

Damit ist anzunehmen, dass das SOC_{max} mit zunehmender elektrischer Nettogleistung zum EDLC etwas steigen soll-

Einfluss elektrischer Nettoleistung vom/zum EDLC auf SOC_{min}

Die Senkung der unteren SOC-Grenze verringert (bei konstanter oberer SOC-Grenze) die Zahl der Starts, und damit den zusätzlichen Energieaufwand für diese. Mit zunehmendem aber noch negativem Faktor für den Einfluss der elektrischen Nettoleistung zum EDLC auf den SOC_{min} (f_{PEL} in Formel 29) sinkt die Verbrauchssumme, wobei in Abbildung 59 bei einem Einflussfaktor bei ca. -0,4 bis -0,2 ein ausgeprägtes Minimum zu beobachten ist. Nach einem Plateau über einem Einflussfaktor von Null steigt der Verbrauch rasch an.

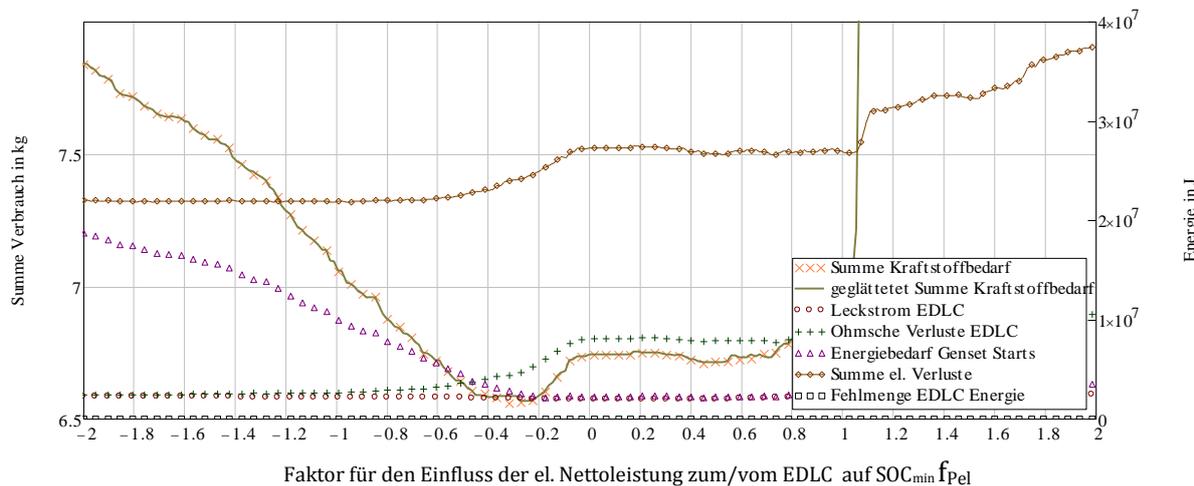


Abbildung 59: Kraftstoffverbrauch bei Variation des Faktors für den Einfluss der elektrischen Nettoleistung zum EDLC auf die Modulation des SOC_{min}

Beim Verbrauchsminimum trifft ein sinkender Energiebedarf für die Starts des Motor-Generator-Satzes mit steigenden Ohmschen Verlusten zusammen. Das Verbrauchsoptimum liegt, wie bei Zusammenschau mit Abbildung 60 ersichtlich, bei unteren SOC-Grenzen von etwas unter -0,2, wobei während der Fahrten teilweise der SOC_{min} auf 0,1 sinkt.

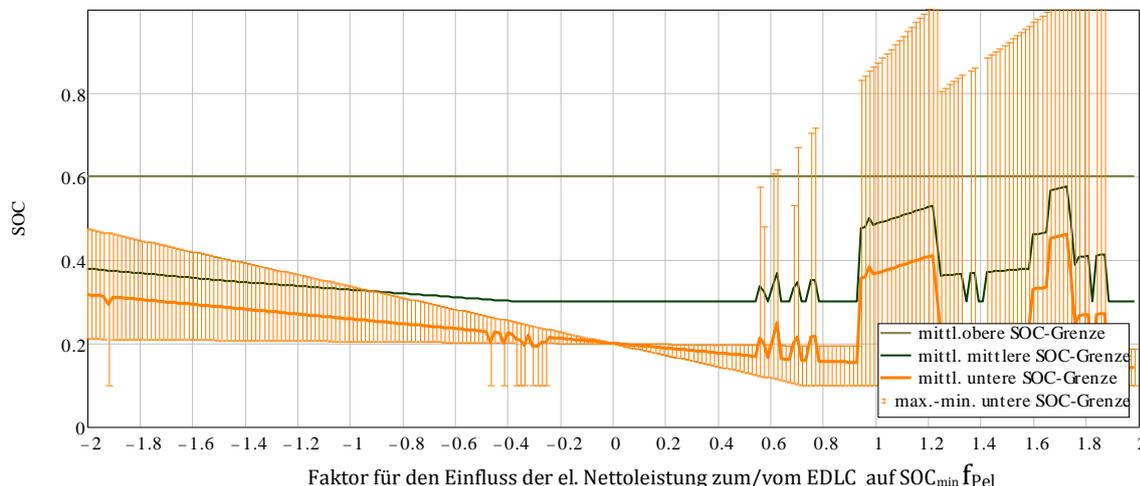


Abbildung 60: SOC-Grenzen bei Variation des Faktors für den Einfluss der elektrischen Nettoleistung zum EDLC auf die Modulation des SOC_{min}

Mit diesem Ergebnis ist davon auszugehen, dass das SOC_{min} mit sinkender elektrischer Nettoleistung zum SOC steigen soll, bis unterhalb eines Einflussfaktors f_{PEL} von ca. 0,3 das SOC_{min} während der Fahrten stärker schwankt, bei gleichzeitig steigendem Mittelwert für das SOC_{min}. Die Hystereseregulung bringt bei SOC_{min}-Werten von 0,2 bis 0,3 die besten Verbrauchswerte, die weiter absinkenden Minima für das SOC_{min} erlauben den Energieinhalt des EDLC optimal

auszunutzen und verringern den Energiebedarf für die Zahl der Starts des Motor-Generator-Satzes.

10.2.4 EINFLUSS SOC AUF DIE SOC-KORREKTUR

Einfluss SOC auf SOC_{max}

Eine steigende obere SOC-Grenze führt zum Absinken sowohl der Ohmschen Verluste als auch der Zahl der Starts des Motor-Generator-Satzes. Bei zu hohen Werten für die obere SOC-Grenze kann jedoch nicht mehr die, um die Verluste verringerte, gesamte Verzögerungsenergie rekuperiert werden. Der Faktor für den Einfluss des SOC auf den SOC_{max} (f_{SOC} in Formel 29) wurde von -2 bis $+2$ variiert. Die Verbrauchssumme für die simulierten 9 Fahrten sinkt, ausgehend von sehr hohen Verbräuchen, bei negativen Einflussfaktoren f_{SOC} und erzeugt, wie in Abbildung 61 ersichtlich, bei einem Einflussfaktor f_{SOC} unterhalb von ca. $+0,2$ ein Verbrauchsminimum. Bei höheren positiven Einflussfaktoren f_{SOC} bleibt der Verbrauch konstant, wobei die obere SOC-Grenze mit $0,9$ limitiert wird, und somit kein größerer Verlust durch unterbliebene Rückspeisung von umgewandelter Verzögerungsenergie auftreten kann.

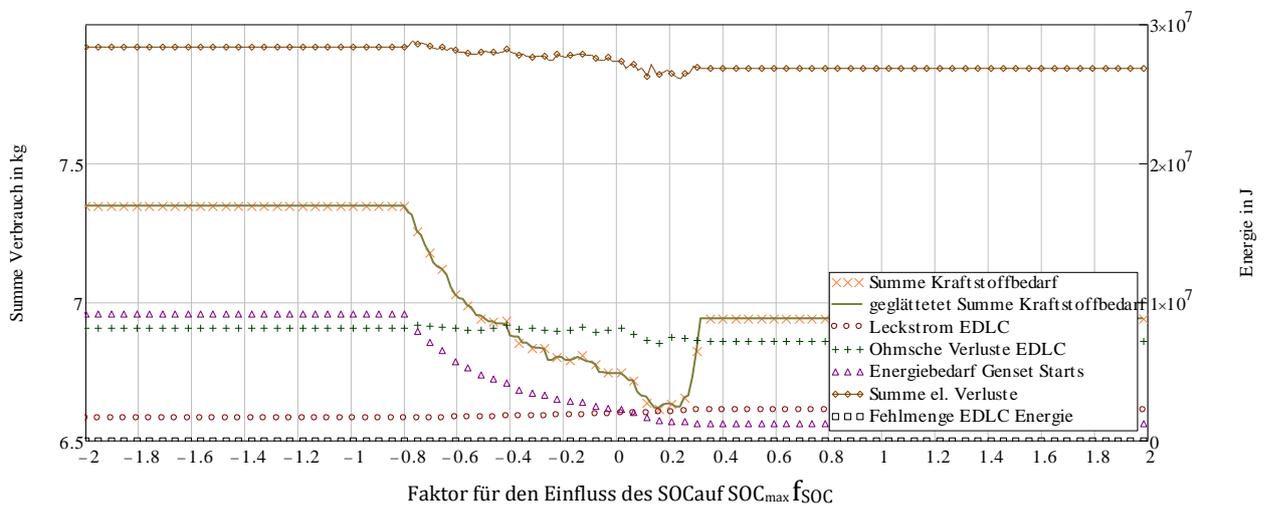


Abbildung 61: Kraftstoffverbrauchssumme bei Variation des Faktors für den Einfluss des SOC auf die Modulation des SOC_{max}

In Richtung des Minimums des Verbrauchs fällt auch der Energiebedarf für die Starts des Motor-Generator-Satzes, aber es sinken auch die Ohmschen Verluste etwas. Wie aus Zusammenschau mit Abbildung 63 ersichtlich, liegt das Verbrauchsmaximum bei mittleren SOC_{max} von ca. $0,7$, wobei die Varianz des SOC_{max} rechts vom Optimum ansteigt.

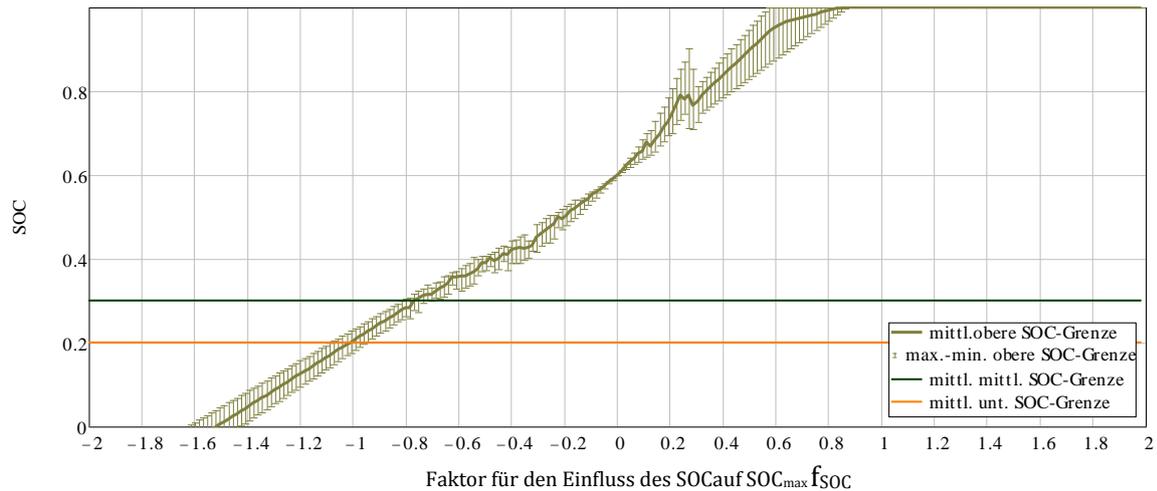


Abbildung 62 Veränderung der SOC bei Variation des Faktors für den Einfluss des SOC auf die Modulation des SOC_{max}

Mit diesen Ergebnissen kann angenommen werden, dass das SOC_{max} mit steigendem aktuellem SOC des EDLC moderat steigen soll. Eine leichte Modulation hoher SOC_{max} führt zu für den Verbrauch vorteilhaften Ergebnissen.

Einfluss SOC auf SOC_{min}

Wenn der SOC die untere SOC-Grenze anhebt, sinken durch die höheren Spannungen im EDLC die Ströme und damit auch die Ohmschen Verluste. Wird dadurch die Differenz zwischen unterer und oberer SOC-Grenze zu groß, so steigt der Energiebedarf für die häufigeren Starts des Motor-Generator-Satzes. Der Faktor für den Einfluss des SOC auf den SOC_{min} (f_{SOC} in Formel 29) erzeugt bis zu Werten für den Einflussfaktor über Null keine Änderung in Bezug auf den Verbrauch. Bei einem Einflussfaktor f_{SOC} von etwas unter +0,4 entsteht ein Minimum, darüber und besonders über einem Einflussfaktor f_{SOC} von +0,6 treten sehr hohe Verbrauchswerte auf.

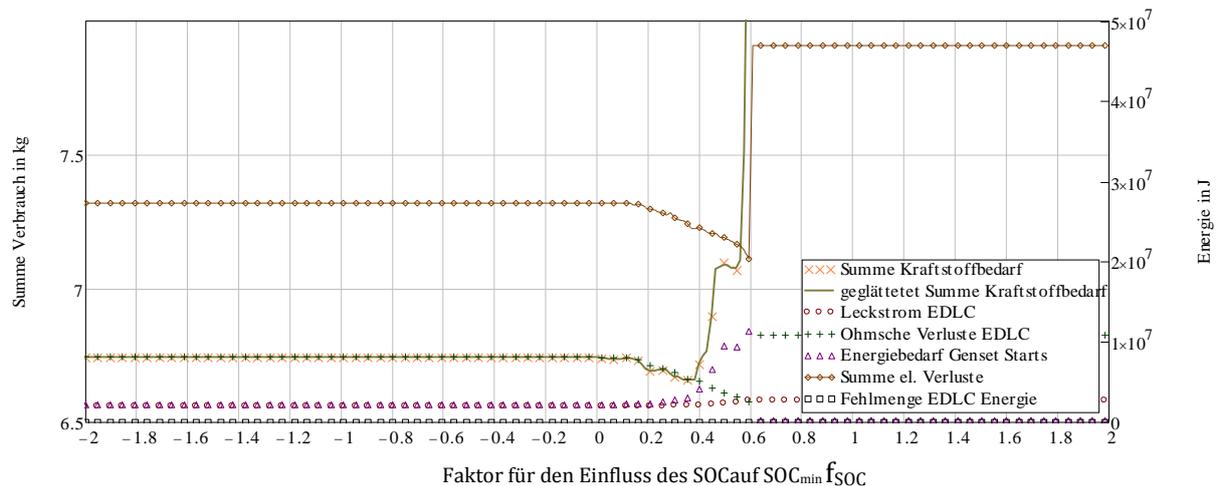


Abbildung 63: Kraftstoffverbrauchssumme bei Variation des Faktors für den Einfluss des SOC auf die Korrektur des SOC_{min}

Beim Verbrauchsminimum trifft, wie in Abbildung 63 gezeigt, ein stark steigender Energiebedarf für die Starts des Motor-Generator-Satzes mit sinkenden Ohmschen Verlusten, also geringeren Netto-Strömen vom/zum EDLC, zusammen. In Zusammenschau mit Abbildung 64 wird ersichtlich, dass das Verbrauchsoptimum bei einem SOC_{min} von etwas über 0,4 auftritt. Bei höheren unteren und damit verbundenen mittleren SOC-Grenzen steigt der Verbrauch rasch.

Dabei verliert durch das Zusammenrücken der Schaltgrenzen die Hystereseregulation an Effektivität.

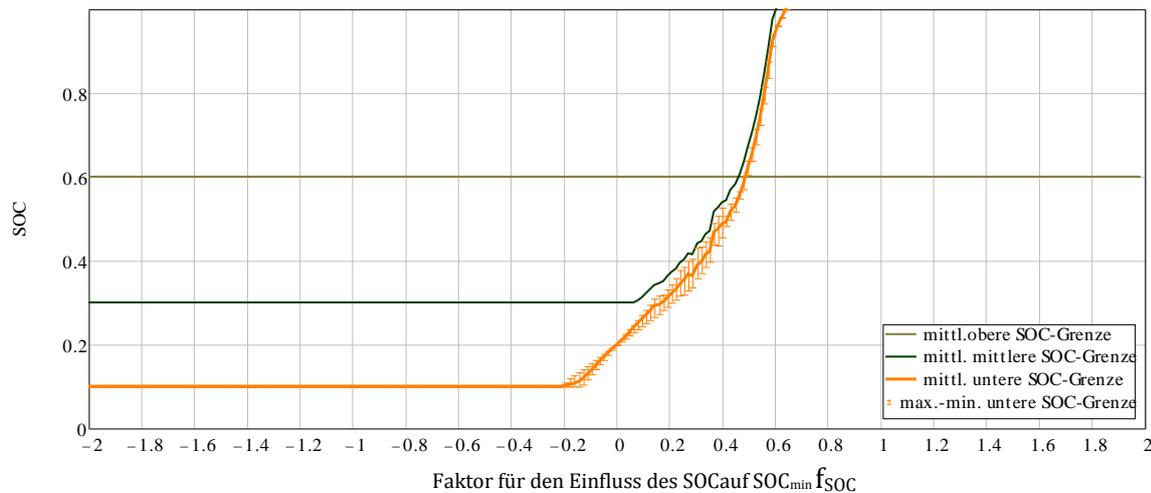


Abbildung 64 Veränderung der SOC-Grenzen bei Variation des Faktors für den Einfluss des SOC auf die Modulation des SOC_{min}

Unterhalb eines Einflussfaktors f_{SOC} von -0,2 wird der SOC_{min} auf 0,1 limitiert, um eine Mindest-Energie für das Anfahren bereitzuhalten. Dadurch bleibt das Ergebnis konstant. Es ist mit diesen Ergebnissen anzunehmen, dass das SOC_{min} mit steigendem SOC steigen soll. Jedoch steigt der Verbrauch rechts vom Minimum sehr stark an, da durch die hohen SOC_{min} -Grenzen die Zahl der Starts des Motor-Generator-Satzes stark ansteigen.

10.3 KOMBINATION DER EINFLÜSSE

Im folgenden Kapitel werden die Einflüsse auf die Schaltgrenzen kombiniert, wobei für die gerechneten Varianten einmal die Einflüsse auf die Modulierung aller Schaltgrenzen gemeinsam untersucht wurde, und einmal getrennt für die obere und untere (sowie laut Modellansatz gleichzeitig auch die mittlere Schaltgrenze).

10.3.1 FAKTORISIERUNG DER EINFLÜSSE AUF ALLE SOC-GRENZEN GEMEINSAM

Hier wird die parallele Beeinflussung der oberen und unteren Grenzen für die SOC-Regelung durch die vier Zustandsfaktoren ohne Berücksichtigung des Abstandseinflusses untersucht. Für die Untersuchung der Kombinationen von Faktoren für den Einfluss der Zustandsgrößen wurden entsprechend der Faktorisierungstabelle (siehe Tabelle 23) bestimmte Faktoren zu Null gesetzt. Die zufällig ermittelten Einflussfaktoren für die Komplementärmenge können dabei unterschiedliche Größe und Vorzeichen für den Einfluss auf unteren und oberen SOC haben. Dabei wurden zufällig gezogenen Kombinationen aus 4 Faktoren für die Einflussgrößen (ident für den Einfluss auf den oberen sowie gemeinsam unteren und mittleren SOC) als Angabe für die Simulationen verwendet. Die Ergebnisliste wurde dann in die 16 möglichen Varianten durch Faktorisierung aufgesplittet. Die Summe der Verbräuche mit ihrem Bestwert sowie die Perzentile für 10 % und 20 % der Lösungen werden in Abbildung 65 für jede der 16 Varianten dargestellt. Die Variante 1 schaltet keine der Einflussfaktoren aktiv und daher ist der Verbrauch konstant, und Variante 16 schaltet alle Einflüsse aktiv.

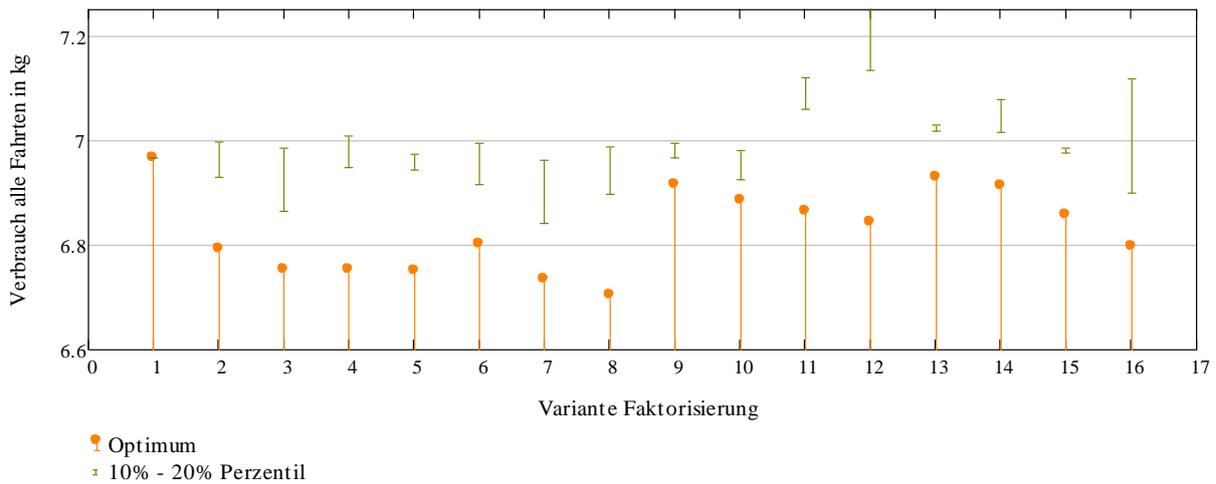


Abbildung 65: Optima und Perzentilwerte P10 und P20 der Verbrauchssummen für die faktorisierten 4 Einflüsse der Zustandsfaktoren bei variabler Busmasse mit 100.000 gerechneten Varianten

Aus Abbildung 65 wird ersichtlich, dass Varianten 7 und 8 die kleinsten Verbräuche mit sich bringen, wobei die beste Variante 8 höhere Perzentilwerte P10 und P20 als Variante 7 zeigt. Zur Interpretation wurden die Kombinationen mit der niedrigsten Verbrauchssumme für alle 9 simulierten Fahrten (siehe Kap. 8.2) in der Tabelle mit der Faktorisierung der Varianten graugrün hinterlegt.

Tabelle 24: Erfolgreichste Varianten der Kombination der Einflüsse der Zustandsgrößen (Faktorisierungstabelle) bei variabler Masse, beste Lösungen sind graugrün hinterlegt

Kombination	Laufzeit GenSet	Spannungsdifferenz EDLC-GenSet	Netto Leistung von /zu EDLC (Strom)	akt. SOC	Faktoren ≠ 0
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	≠ 0	1
3	0	0	≠ 0	0	1
4	0	0	≠ 0	≠ 0	2
5	0	≠ 0	0	0	1
6	0	≠ 0	0	≠ 0	2
7	0	≠ 0	≠ 0	0	2
8	0	≠ 0	≠ 0	≠ 0	3
9	≠ 0	0	0	0	1
10	≠ 0	0	0	≠ 0	2
11	≠ 0	0	≠ 0	0	2
12	≠ 0	0	≠ 0	≠ 0	3
13	≠ 0	≠ 0	0	0	2
14	≠ 0	≠ 0	0	≠ 0	3
15	≠ 0	≠ 0	≠ 0	0	3
16	≠ 0	≠ 0	≠ 0	≠ 0	4
Summe Auftreten	0	2	3	2	

Tabelle 20 zeigt, wie häufig die Einflussfaktoren bei den besten Lösungen auftreten. Bei den farblich hinterlegten besten Lösungen kommt die Laufzeit nicht vor, die Nettoleistung vom/zum EDLC am häufigsten, erklärbar durch den Einfluss auf die Ohmschen Verlust. Die in Abbildung 65 am besten abschneidende Variante 8 benutzt drei Einflüsse von Zustandsfaktoren.

Da eine bessere Annäherung an das unbekanntes Optimum erwartet wird, soll im folgenden Kapitel eine getrennte Beeinflussung der oberen und unteren Schaltgrenzen der Hystereseregulation betrachtet werden.

10.3.2 GETRENNTE BETRACHTUNG DER EINFLÜSSE AUF DIE OBERE UND UNTERE SOC-GRENZE

Da mit den Ergebnissen aus Kap. 10.3.1 erwartet werden kann, dass unterschiedliche Faktoren für Einflüsse auf die untere und obere SOC-Grenze ein niedrigeres Verbrauchsoptimum hervorbringen, wurde eine Faktorisierung von zwei Alternativen für acht Variablen durchgeführt. Die Erhöhung der Zahl der Kombinationen auf 256 macht diese allerdings schwerer graphisch darstellbar. Die Variante 248 (gerechnet mit konstanter Busmasse d. h. Insassengewicht) schneidet in Bezug auf die Verbrauchssumme für alle Fahrten am besten ab. Durch die Begrenzung des Speicherlatzes nimmt die Zahl der Berechnung pro Variante bei 256 Varianten ab, und damit auch die Validität dieser Ergebnisse. Tabelle 25 zeigt die Einflussfaktoren für diese optimalen Kombinationen aus der Faktorisierung und lässt den Schluss zu, dass es vorteilhaft ist alle Einflüsse bis auf die Laufzeit des Motor-Generator-Satzes auf den unteren SOC zu berücksichtigen:

Tabelle 25: Optimale Kombination Faktorisierung bei getrennten Faktoren für den Einfluss auf SOC_{min} und SOC_{max} bei konstanter Busmasse 50.000 Varianten gerechnet

Einfluss von auf	Laufzeit GenSet	Spannungsdifferenz EDLC - GenSet	Netto-Leistung vom/zum EDLC (Strom)	SOC
obere SOC-Grenze	≠0	≠ 0	≠0	≠0
untere SOC-Grenze	0	≠ 0	≠ 0	≠ 0

Beim Vergleich ist auch ersichtlich, dass die nach Abbildung 65 bestgereichte Kombination der Einflussfaktoren ebenso ohne Einfluss der Laufzeit auskommt.

10.3.3 EXEMPLARISCHE VARIATION VON FAKTOREN FÜR ZWEI EINFLUSSGRÖßEN

Bei der Untersuchung der Kombinationen von Einflüssen, konnte auch eine Variante mit relativ niedrigem Verbrauch identifiziert werden, bei der nur Faktoren für zwei Einflüsse (Spannungsdifferenz Motor-Generator-Satz-EDLC und Strom in/aus EDLC) variiert werden müssen. Damit entstünde ein geringerer Aufwand bei der Implementierung (Hardware und Software). Da die besten Kombinationen aber von mehreren Einflussfaktoren abhängen, liegt diese Kombination in der Reihung nach der niedrigsten Verbrauchssumme jedoch nicht im Spitzenfeld. Die Berücksichtigung von nur zwei Zustandsgrößen erlaubt jedoch eine Visualisierung. Die Faktoren für die Einflüsse der Spannungsdifferenz $f_{\Delta V}$ in Formel 29 auf die obere SOC-Grenze wurden von $-0,5$ bis $+0,5$ variiert und die Faktoren für den Einfluss des Stroms (ausgedrückt als Leistung) auf die untere SOC-Grenze f_{Pel} von -1 bis 0 , um die Fläche in Abbildung 66 in den Bereich der gültigen Lösungen zu rücken.

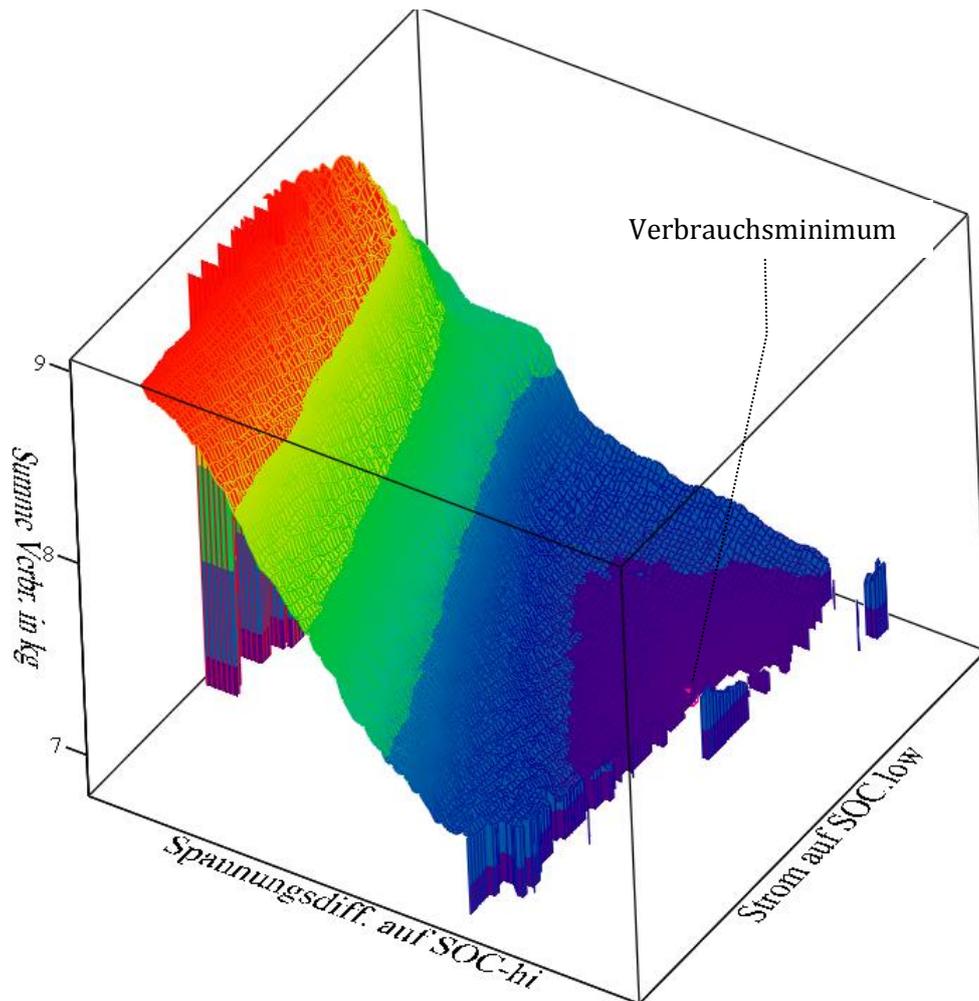


Abbildung 66: Verbrauchssumme für 9 Fahrten bei Variation von Faktoren für zwei Einflüsse

Die Auswirkung des Faktors für den Einfluss der Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Motor-Generator-Satz auf die obere SOC-Grenze ist sehr deutlich sichtbar. Dagegen ist beim Faktor für den Einfluss des Stroms (ausgedrückt als Netto-Leistung vom/zum EDLC) auf die untere SOC-Grenze ein flacherer Verlauf zu sehen. Die Optima treten dabei in den Grenzbereichen auf, wo die Bedingungen für eine gültige Simulation erreicht werden. Da in Abbildung 66 der Einfluss der Spannungsdifferenz hoch ist, obwohl diese keine große Auswirkung auf die elektrischen Verluste hat, kann vermutet werden dass eine Scheinkorrelation wirkt, weil die Spannungsdifferenz auch mit dem SOC des EDLC korreliert. Bei sehr hohen SOC ist es nicht mehr möglich, die gesamte Verzögerungsenergie zu rekuperieren und es entstehen durch den hohen Anteil der Beschleunigung am Fahrtwiderstand (siehe Abbildung 10) auch hohe Verbräuche.

11 ANALYSE DER EIGNUNG DER *MONTE-CARLO*-SIMULATION FÜR DIE BESTIMMUNG DES OPTIMALEN MODULATIONSSCHEMAS FÜR DIE SCHALTGRENZEN

11.1 VORGEHENSMODELL BEI NUTZUNG DER MC-VARIATION

11.1.1 EINLEITUNG

Eine Beschreibung der Methodik der gemeinsamen Variation aller Parameter im Monte Carlo Ansatzes leitet das Kapitel 11 ein. Es werden sowohl die Faktoren für den Einfluss der Zustandsgrößen, als auch die Faktoren für die Berücksichtigung der Abstände zu den potentiellen Zwangshalten bei der Modulation der SOC-Grenzen variiert. In Folge wird die Arbeitshypothese überprüft, die der Berücksichtigung der Abstände zu den potentiellen Zwangshalten bei der Festlegung der SOC einen positiven Effekt zuschreibt. Schlussendlich wird die Stabilität und Sensibilität des vorgestellten Verfahrens analysiert.

Da die Ergebnisse bei der Monte Carlo Simulation zufällig sind, führen unterschiedliche Stichprobengrößen zu anderen Ergebnissen. Auch teilweise mit speziellen Annahmen gerechnete Vergleiche machen die Werte in den Abbildungen nicht immer vergleichbar. Es wurde aber auch, um dem entgegenzuwirken und eine Einheitlichkeit der Darstellung zu fördern, hier wenn möglich die erst später eingeführte Variante mit während der Fahrt variierender Fahrgastzahl nutzt.

11.1.2 VORGEHENSWEISE BEI DEN UNTERSUCHUNGEN

Aus der in Kap. 10 durchgeführten Sensibilitätsanalyse und der Faktorisierung der Varianten für die Einflüsse auf die Schaltgrenzen der Hystereseregulung (Einflussfaktoren) soll ein Ansatz entwickelt werden, mit dem eine dem Verbrauchsoptimum nahe kommende Lösung bestimmt werden kann. Dabei hat sich ein heuristisches Vorgehensmodell als am besten geeignet herausgestellt. Abbildung 67 zeigt diesen rückgekoppelten Prozess der Bestimmung der Angaben für die Variation der Einflussfaktoren, wie er um die Simulation herum gebaut wurde.

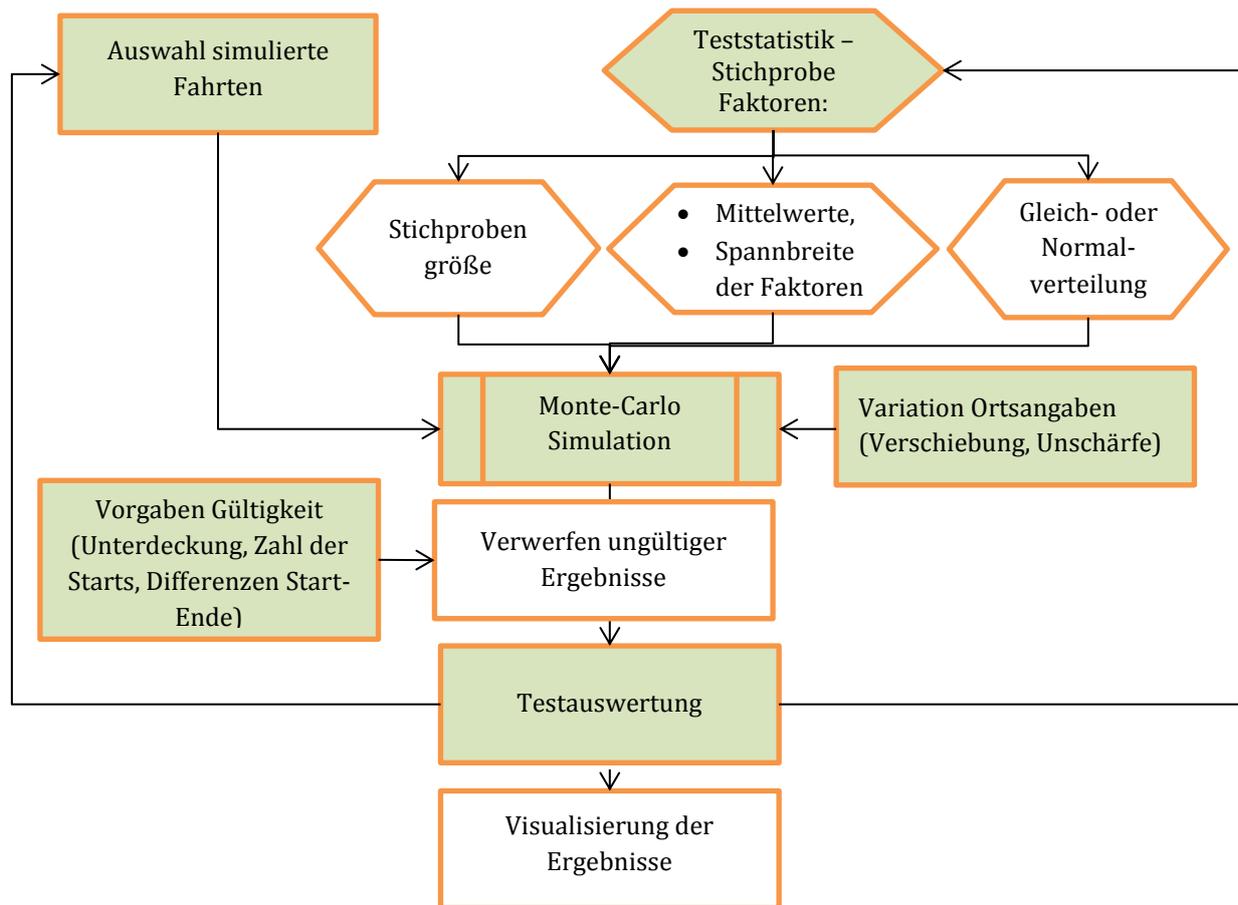


Abbildung 67: Heuristischer Ansatz für die Implementierung der Untersuchungen auf Basis der Monte-Carlo Simulation

Die Teststatistik, die die Stichprobe für die in der MC-Simulation untersuchten Einflussfaktoren definiert, muss sowohl die Aufgabenstellung für die Untersuchungen berücksichtigen, aber auch die Machbarkeit der Umsetzung in der Simulationsumgebung (Rechenzeiten und Arbeitsspeicher) gewährleisten. Das Simulationsmodell für den seriell-hybriden Antrieb selbst bleibt dabei bei den verschiedenen Auswertungen als Kern der MC-Simulation (bis auf Veränderungen der Liste der zurückgegebenen zeitabhängigen Ergebnisse) unangetastet dasselbe. Die Testauswertung basiert auf dem Vergleich von Summenwerten wie dem Verbrauch für alle Fahrten, oder Statistiken mit Werten für eine oder alle Fahrten. Rechnungen mit Faktorensätzen, die nicht gültige Ergebnisse liefern, werden möglichst frühzeitig abgebrochen.

11.1.3 TESTSTATISTIK

Durch den *Monte-Carlo*-Ansatz ist es möglich die beste Faktorenkombination im Einflussmodell für die SOC-Korrektur, die sowohl den Abstand zu den potentiellen Zwangshalten, als auch die Zustandsgrößen nutzt, zu ermitteln. Dazu werden alle 27 Einzel-Faktoren (siehe Formel 34 und Kap. 14.1, im Rahmen der Spezialuntersuchungen auch mehr) zufällig variiert. Die Bandbreite wurde dabei nach den Ergebnissen der Sensibilitätsuntersuchung nicht weiter eingeschränkt, da kompensierende Effekte bei gleichzeitiger Variation mehrerer Parameter höhere Einflussfaktoren favorisieren könnten. Für die Untersuchung der Eignung unterschiedlicher Ansätze wurden Schalter in das Unterprogramm integriert, das die Zufallszahlen generiert. So wurde im Rahmen einer Faktorisierung abwechselnd der Einfluss der Ferne und der Nähe von potentiellen Zwangshalten auf die SOC-Grenzen abgeschaltet um herauszufinden welcher Ansatz für welche SOC-Grenze optimal ist. Weiters wurden abwechselnd die ermittelte für die Rekuperation freizuhalten oder für das Anfahren vorzuhaltende relative Energie oder Eins als

Multiplikator für den Einfluss von Nähe- oder Ferne zu den potentiellen Zwangshalten bei Berechnung der SOC-Korrektur benutzt. So ergab sich folgende in Tabelle 26 dargestellte Versuchsplanung für die *Monte-Carlo*-Variation.

Tabelle 26: Beschreibung der Interquartilbereiche⁸ bei der Versuchsplanung zur MC-Variation

Interquartilbereiche 1-3	<ul style="list-style-type: none"> • 50 % der Lösungen ohne Zustandseinfluss • alternativ relative Vorhalte- oder Freihaltenergie (zum Beschleunigen beziehungsweise beim Anhalten) • Auswahl ob Multiplikator für abstandsabhängige Korrektur 1 statt relative Vorhalte- oder Freihaltenergie
Interquartilbereich 4	<ul style="list-style-type: none"> • keine Abhängigkeit SOC-Korrektur vom Abstand: vom Abstand zu Zwangshalten abhängige Faktoren sind daher Null

Die Unterschiede der Interquartilbereiche 1 bis 3 ergeben sich zufällig über die Ziehungsergebnisse für die drei Alternativen. Nachteil der Variation dieser hohen Zahl von Einflussfaktoren und der Subgliederung in Interquartilbereiche ist, dass ein Vergleich der Optima der Varianten eine sehr große Stichprobe benötigt, damit für jede Variante eine Lösung nahe dem Optimum gefunden werden kann. Bei einer Optimierung der Ansätze aus einem Interquartilbereich wurde, wenn nötig, die gesamte Stichprobengröße nur für diesen Interquartilbereich genutzt und die anderen Interquartilbereiche aus der Generierung der Zufallsgrößen für die MC-Variation genommen. Darüber hinaus wurden vom Simulationskern keine Einzelwerte an die MC-Simulation übergeben, um den im der Simulationsumgebung benötigten Speicherplatz zu verringern.

Die Zufallsstichprobe für die Parameter wurde entsprechend Tabelle 26 aufgeteilt. Es werden wie z. B. in Abbildung 68 meist aus technischen Gründen nur die besten 10.000 Varianten aus der Gesamtheit der gültigen Ergebnisse wiedergegeben. Bei der Darstellung der Kraftstoffverbräuche über die elektrischen Verluste in wird ersichtlich, dass die Minima für den Verbrauch gegenüber der Nullvariante auch geringere elektrische Verluste als die Nullvarianten haben (bei der konstante Schaltgrenzen für die Hystereseregulation angenommen wurden).

⁸ In den Interquartilsbereichen liegen jeweils 25% der Werte einer Stichprobenverteilung.

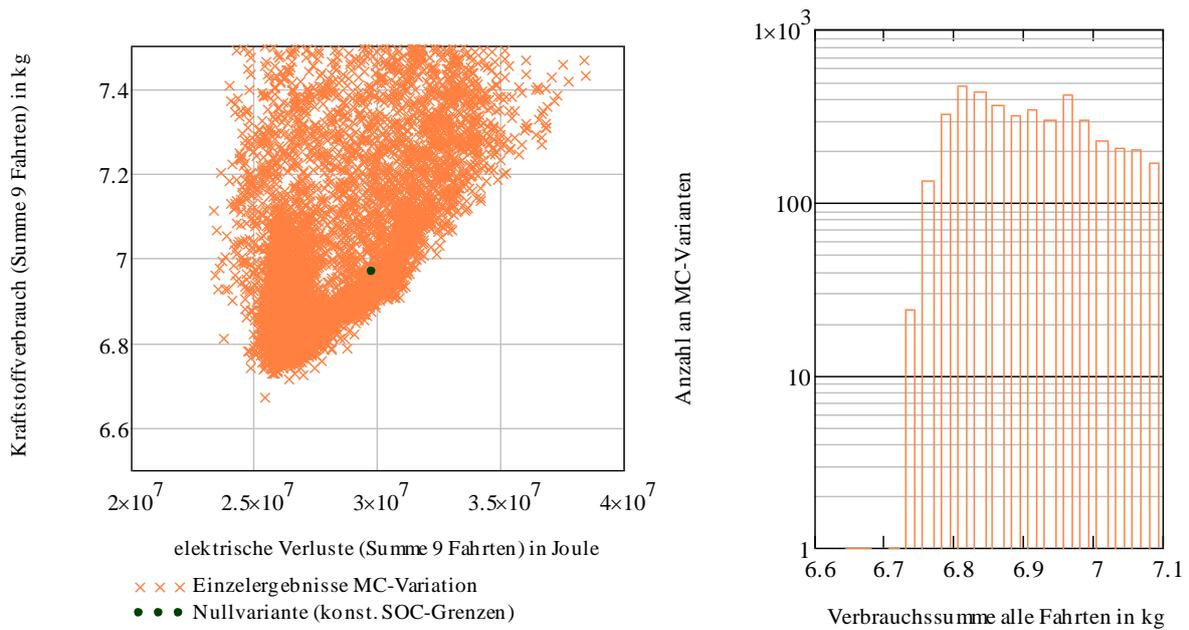


Abbildung 68: Ergebnisse der MC-Variation (100.000 Varianten berechnet, variable Busmasse)

Im Vergleich zur Nullvariante liegen aber nicht alle berechneten Varianten im Verbrauch besser, wie Abbildung 67 auch zeigt. Dieser Umstand ist bereits aus der Variation der einzelnen Faktoren in Kap. 10.2 bekannt. Im Histogramm wird sichtbar, wie gegen das Minimum die Häufigkeit des Auftretens von Lösungen stark abnimmt, in der grafischen Darstellung der Ergebnisse in Abbildung 67 vereinzeln die Werte deutlich. Die Zufälligkeit des Auftretens von deutlich niedrigeren Verbräuchen erfordern eine nähere Betrachtung der Umstände des MC-Verfahrens.

11.2 VERFAHRENSSPEZIFISCHE UNTERSUCHUNGEN

11.2.1 EINFLUSS DER ZAHL DER VARIATIONEN

Bei der *Monte-Carlo*-Variation werden die Faktorenkombinationen zufällig ausgewählt. Bei einer höheren Losgröße werden mehr Varianten mit unterschiedlichen Faktorenkombinationen untersucht. Es ist dabei anzunehmen, dass dabei neue Lösungen entdeckt werden, die dem Optimum näher kommen. Durch die zufällige Wahl der Einflussfaktoren kann aber auch bei einer Berechnung von nur wenigen Varianten für die Einflussfaktoren zufällig ein Minimum für die Summe des Kraftstoffverbrauchs gefunden werden, das deutlich unter der Nullvariante mit konstanten SOC-Grenzen ($SOC_{\min} = 0,2$ und $SOC_{\max} = 0,6$) liegt. Der Vergleich der Varianten (Interquartilbereiche) kann also durch Zufallseffekte bei nicht ausreichenden Stichprobengrößen zu vorschnellen Aussagen führen. Im Folgenden wird daher der Einfluss der Stichprobe untersucht. Abbildung 68 zeigt MC-Simulationen mit unterschiedlicher Zahl von Varianten. Mit steigender Losgröße werden die besten Lösungen nach unten links in Richtung geringere elektrische Verluste und sinkender Verbräuche häufiger.

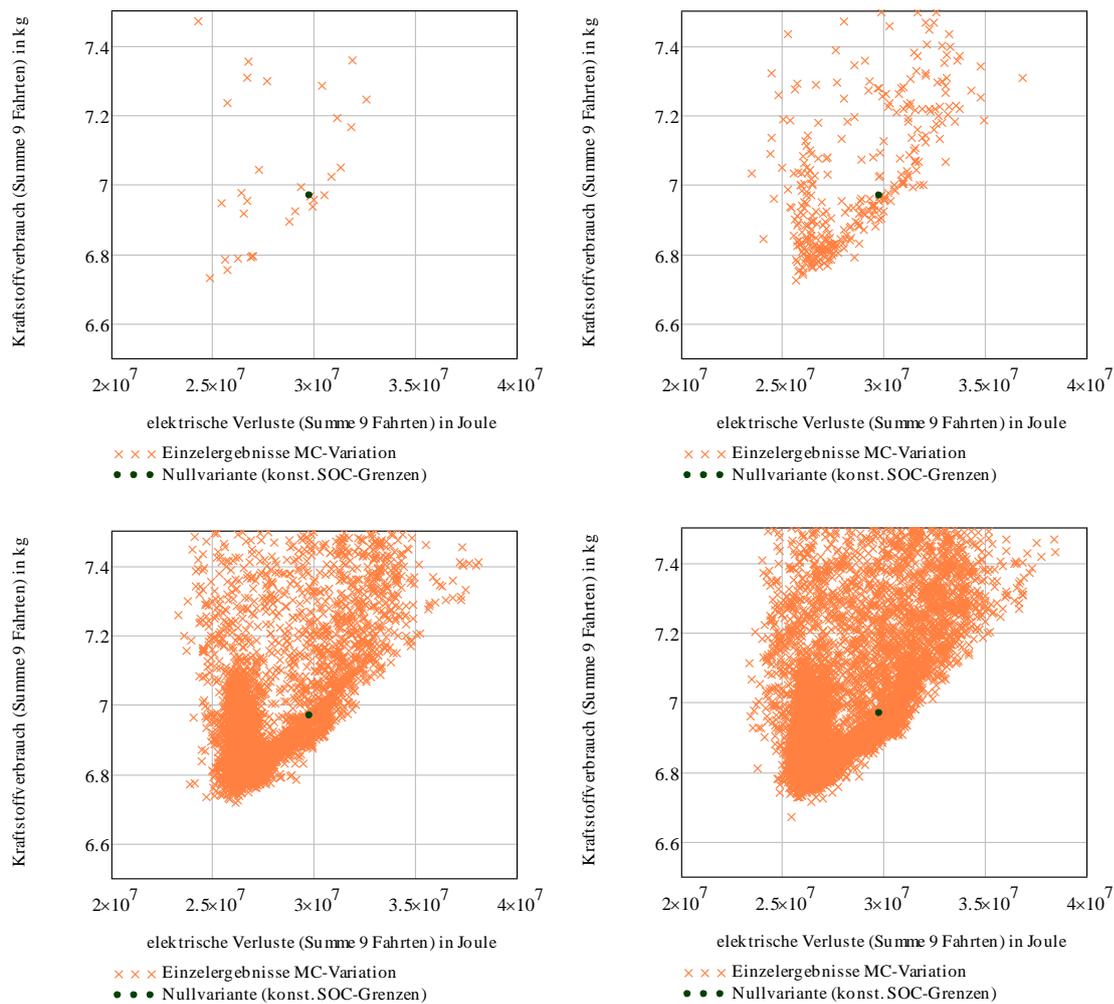


Abbildung 68: Beispielhafte graphische Darstellung der besten gültigen Ergebnisse der MC-Variation bei von 1000 auf 100.000 zunehmender Zahl der untersuchten Lösungen, markiertes Optimum, variable Busmasse

Das ermittelte Verbrauchsminimum sinkt nicht automatisch mit zunehmender Zahl der gerechneten Varianten (Losgröße), aber ein Trend dazu ist in Abbildung 69 zu erkennen. Daher sind bei der Wahl der *Monte-Carlo* Variation u.U. sehr lange Rechenzeiten in Kauf zu nehmen, um in die Nähe des absoluten Optimums zu gelangen. Die Zahl der in Abbildung 69 aufgetragenen, nach den Einschränkungen aus Kap. 9.4.5 gültigen, Ergebnissen ist um mindestens eine Zehnerpotenz kleiner als die Stichprobengröße. Ab $2 \cdot 10^5$ Varianten treten bei der eingesetzten Software aus Speichertechnischen Gründen auch Probleme mit der Stabilität auf. Abbildung 69 zeigt dass auch bei mittleren Stichprobengrößen zufällig Lösungen auftreten, die dem Optimum nahe kommen.

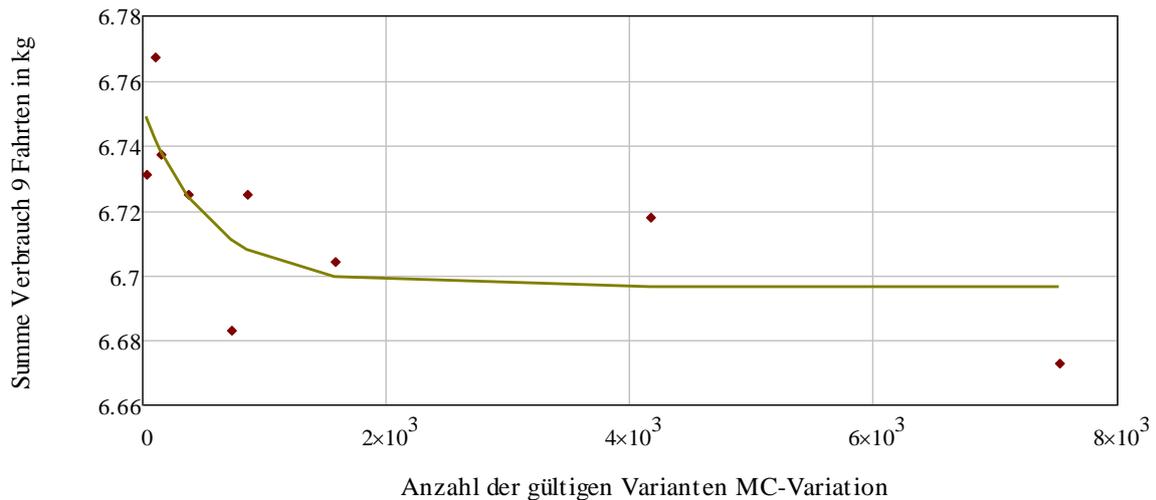


Abbildung 69: Verbrauchsminimum MC-Variation bei steigender Stichprobengröße (variable Busmasse)

Durch die Aufteilung auf 256 Varianten bei der Faktorisierung sinkt bei limitierter konstanter Zahl von Berechnungen die Zahl der gültigen Lösungen für jede Kombination der Einflussfaktoren um mehr als zwei Zehnerpotenzen. Die Suche nach einer Lösung nahe dem absoluten Optimum erfordert aber eine sehr hohe Zahl von gerechneten Varianten.

Bei der Ziehung der Einflussfaktoren wird eine **Standardverteilung der Zufallszahlen** benutzt. Für die Annäherung an das Optimum kann es vorteilhaft sein, die Mittelwerte der Standardverteilung auf die gefundenen Optima zu legen und die MC-Variation neu zu starten. Abbildung 70 vergleicht zur Validierung der Hypothese die Lösungen für Gleich- und Standardverteilung, wobei die Ergebnisse für eine höhere Nutzlast berechnet wurden. Dargestellt werden die Varianten aufsteigend nach Höhe des Verbrauchs sortiert.

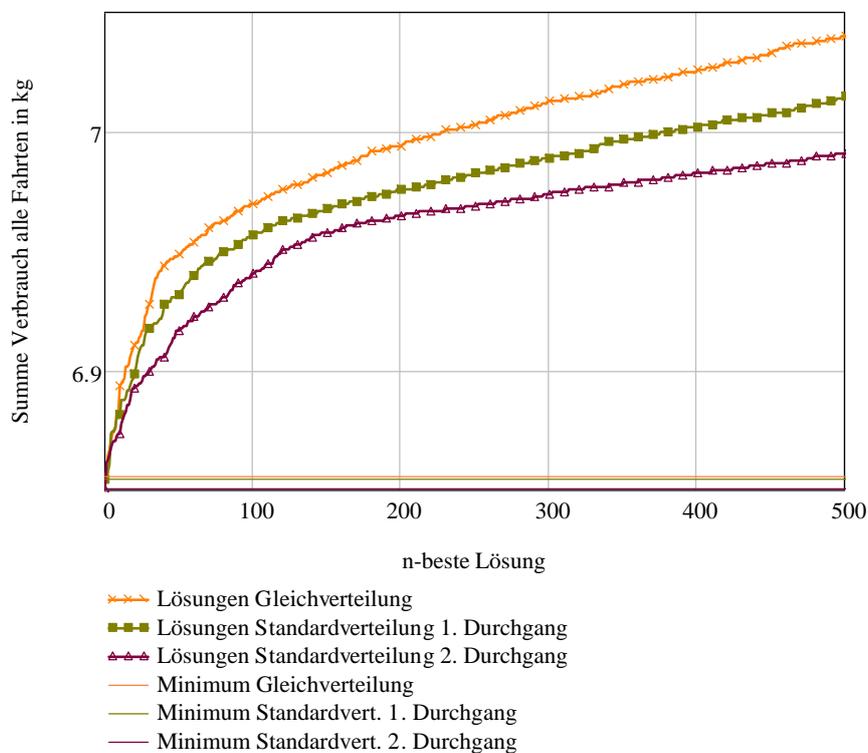


Abbildung 70: Darstellung der besten 500 Varianten für Gleich und Standardverteilung der Faktoren für den Einfluss der Zustandsgrößen

Die nach Güte der Lösung sortierte Anordnung in Abbildung 70 zeigt einen geringen Vorteil der mittels Standardverteilung in zwei Schritten ermittelten Zufallszahlen, sowohl für Lösungen mit größerem Abstand zum Bestwert als auch für das ermittelte Minimum. Mehr wirksam ist eine zweistufige Vorgehensweise. Wird eine Lösung nahe dem Optimum gesucht, ist es bei der Generierung der Zufallszahlen in der MC-Simulation bei beschränkter Zahl von gerechneten Varianten sinnvoll im zweiten Schritt die Bandbreite und der Mittelwert der Faktoren der Einflüsse der Zustandsgrößen auf die SOC-Grenzen nach Formel 29 zu benutzen, wie sie in Abbildung 71 gezeigt wird.

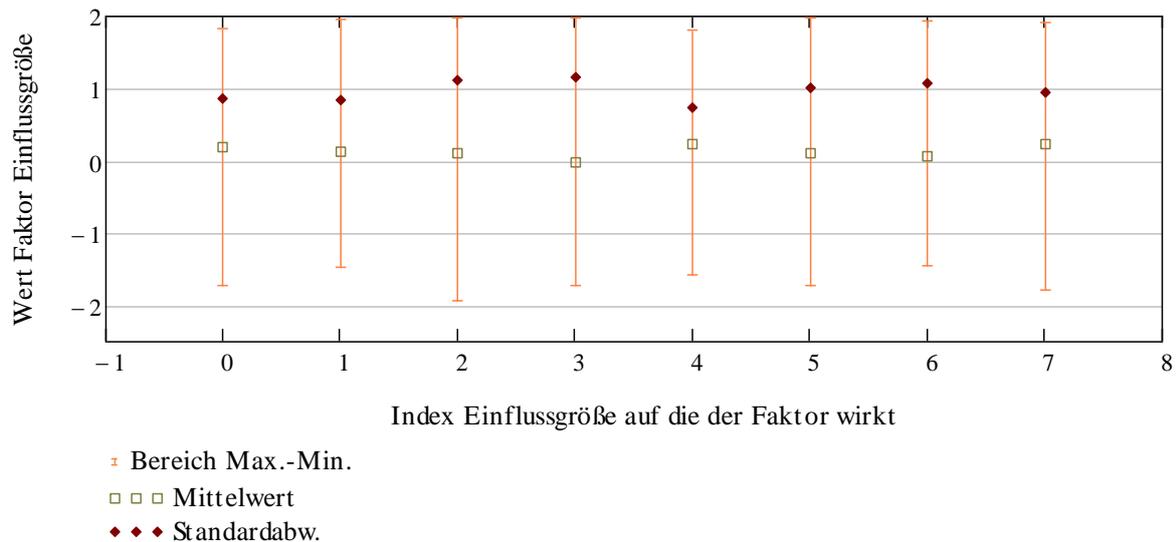


Abbildung 71: Statistische Auswertung der 25 besten Lösungen für die Variation der ersten 8 Einflussfaktoren (für eine Auflistung aller Faktoren siehe Kap. 14.1 Einflussfaktoren).

Die in Abbildung 71 wiedergegebene Standardabweichung der besten 25 Einflussfaktoren zeigt aber auch, dass bei den besten Lösungen eine hohe Varianz der Einzelfaktoren besteht. Es ist daher anzunehmen, dass bei Beschränkung der Grenzen der Einflussfaktoren optimale Lösungen verfehlt werden könnten, wenn sich die Randbedingungen der Simulation ändern wie z. B. die Basisdaten für den Bus oder die Charakteristik der Fahrt. Bei einer höheren Zahl von Variationen (begrenzt durch Einschränkungen der Berechnungsumgebung auf ca. $2 \cdot 10^5$) kann auf das aufwändige iterative und in der genutzten Softwareumgebung auch manuelle Verfahren zur Festlegung der Grenzen der Variation verzichtet werden. Dies umso mehr, wenn die Variationen auf einen Typ (Interquartilsbereich) nach Tabelle 27 beschränkt werden. Es kann anhand Abbildung 69 angenommen werden dass es bei größeren Stichproben nicht mehr zu deutlichen Verbesserungen beim Verbrauch kommen wird

11.2.2 EINFLUSS DER MODELLIERUNG DES BETRIEBES (VERLAUF DER NUTZLAST)

Der Einfluss einer während der Fahrt variablen Zahl von Fahrgästen wurde über ein Modell untersucht, bei dem die Zahl der ein- und aussteigenden Fahrgäste an den Haltestellen über einen Zufallsgenerator festgelegt wurde. Vereinfachend wurde dabei eine Masse von 65 kg pro Person angenommen. Zusätzlich wurden physikalische Grenzen für die minimale und maximale Zahl der Fahrgäste im Fahrzeug berücksichtigt. Abbildung 69 zeigt den zufälligen Verlauf des Besetzungsgrades, der für weitere Untersuchungen gespeichert wurde, um bei Vergleichen der Grafiken untereinander Einflüsse unterschiedlicher Massen auf die absolute Höhe der Verbräuche zu vermeiden.

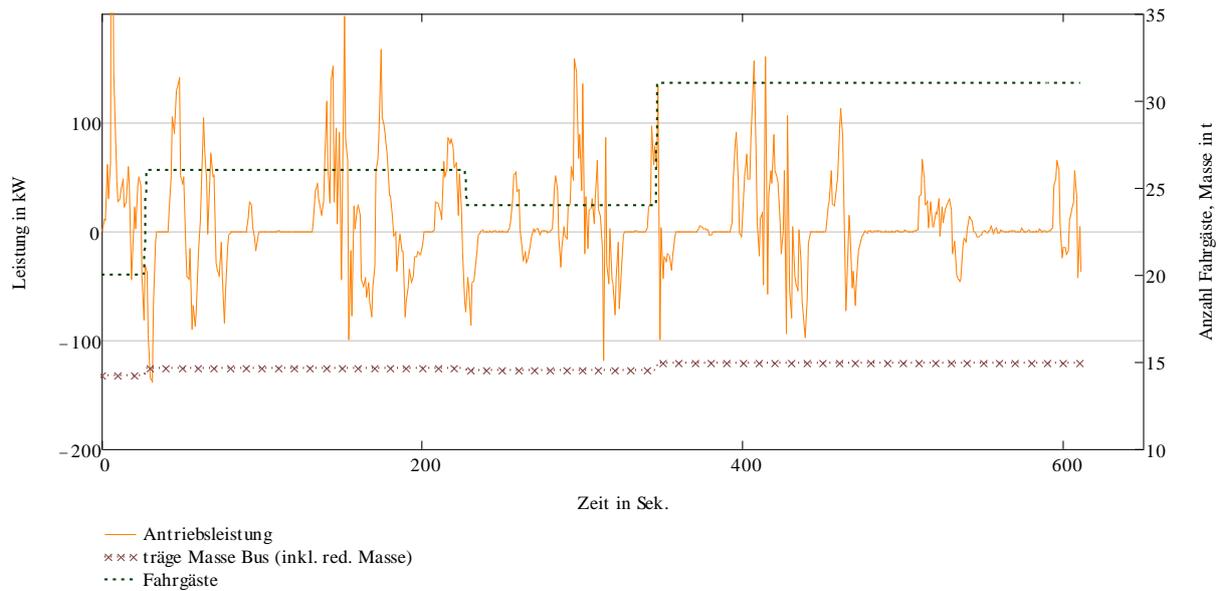


Abbildung 73: Beispiel Ergebnis der Modellierung variabler Besetzungsgrad während der Fahrt

Auf der Basis mehrerer Berechnungen mit unterschiedlichem Verlauf der Besetzung wurde eine Statistik mit der Summe des positiven Energiebedarfs für den Antrieb erstellt. Dabei ergaben sich wie in Abbildung 72 gezeigt, je nach Fahrt, Abweichungen der Antriebsenergie von 10 % bis 15 %.

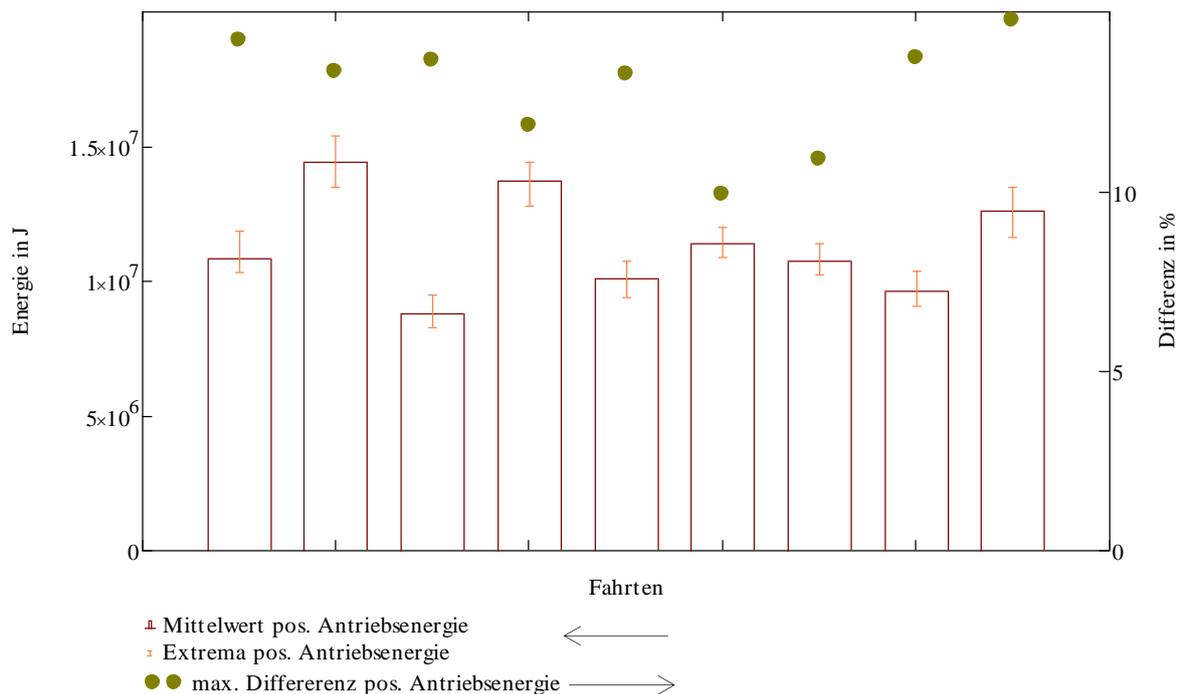


Abbildung 73: Auswirkung der Variation des Besetzungsgrades während der Fahrt auf die Antriebsenergie

Da die Energieumsätze variieren, ergeben sich auch andere Summen-Verbräuche für die zufällig berechneten Szenarien mit dem variablen Besetzungsgrad. Es kann anhand der bei der MC-Variation erzielten Ergebnisse davon ausgegangen werden, dass sich die Parametersätze der Lösungen mit den niedrigsten Verbräuchen für unterschiedliche Verläufe des Besetzungsgrades unterscheiden.

11.2.3 NÜTZLICHKEIT DER BERÜCKSICHTIGUNG DES ABSTANDEINFLUSSES

Eine Arbeitshypothese ging davon aus, dass die Berücksichtigung des Abstandes von potentiellen Zwangshalten die Lösung in Hinblick auf den Verbrauch verbessert. Zur Überprüfung dieser Arbeitshypothese wurden zwei Ansätze entwickelt.

Ansatz 1: Vergleich der Optima der Varianten mit und ohne Abstandseinfluss bei der Variation der SOC-Grenzen für die gesamte *Monte-Carlo* Stichprobe.

Ansatz 2: Vergleich des Verbrauchs für alle Fahrten für die Varianten mit und ohne Abstandseinfluss bei der Variation der SOC-Grenzen, die bei einer Teilmenge an Fahrten bei der *Monte-Carlo* Variation die beste Lösung erzielen.

11.2.3.1 VALIDIERUNG ANSATZ 1: VERGLEICH VON LÖSUNGEN MIT UND OHNE ABSTANDSEINFLUSS

Abbildung 75 zeigt die Ergebnisse in der bekannten Darstellung mit Verbrauch und elektrischen Verlusten, die in Varianten mit Abstandseinfluss und ohne Abstandseinfluss auf die SOC-Grenzen getrennt wurden. Weiters erfolgte eine Unterteilung der Varianten mit Abstandseinfluss, in Varianten mit und ohne Einfluss der Zustandsgrößen auf die SOC-Grenzen.

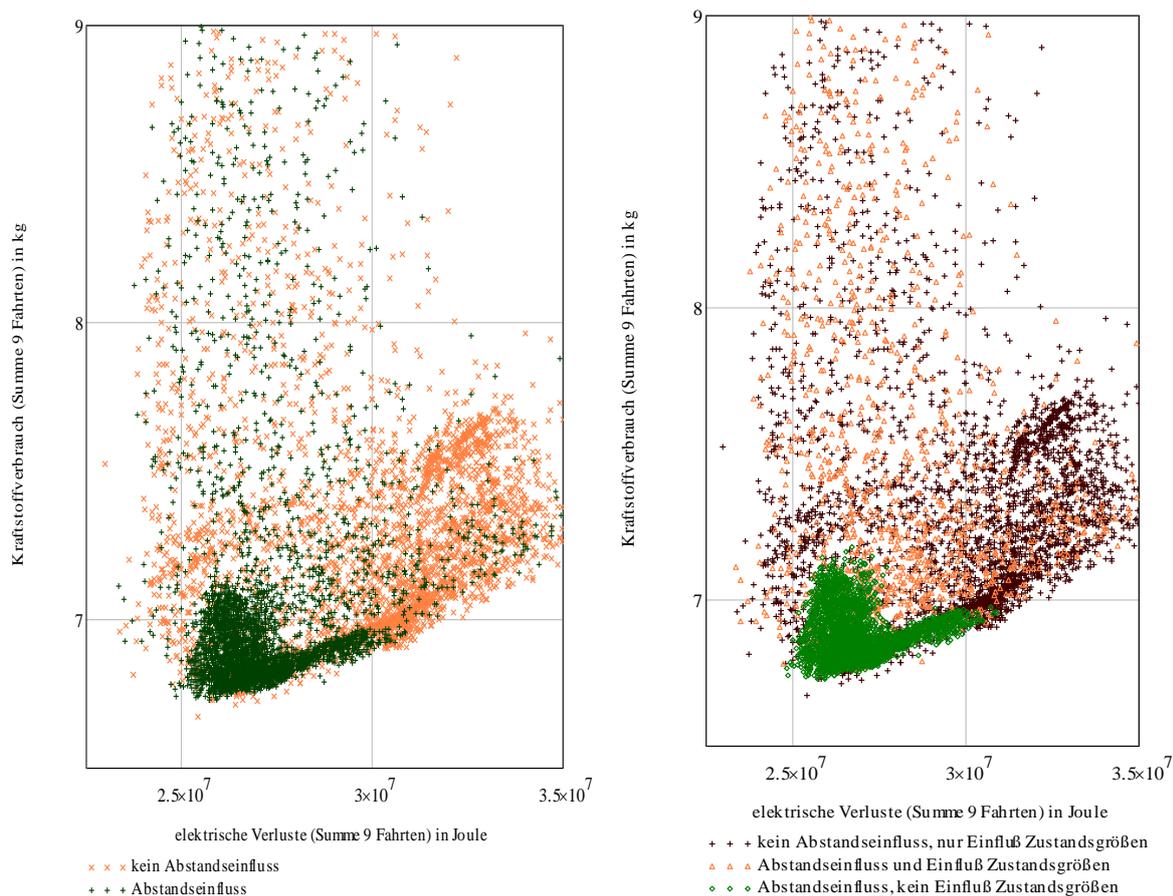


Abbildung 75: Vergleich der Ergebnisse der MC-Simulation, 150.000 Varianten mit und ohne Abstandseinfluss, beziehungsweise mit und ohne Einfluss der Zustandsgrößen, mit Begrenzung auf max. 120 Starts

Von den dargestellten besten 10.000 Lösungen haben ca. 5300 einen ausschließlichen Einfluss der Zustandsgrößen, ca. 3200 einen ausschließlichen Einfluss des Abstandes und ca. 1200 nutzen beide Einflüsse für die Modulation der SOC-Grenzen. Im Gegensatz zu diesen Zahlen zeigt aber Abbildung 75, dass sich die Lösungen mit Abstandseinfluss mit ihrem Schwerpunkt der Lösungen in der unteren Hälfte der Ordinate befinden. Das Verfahren mit ausschließlichem

Einfluss der Zustandsfaktoren, erzeugt aber die Lösung mit dem absolut niedrigsten Verbrauchswert.

Abbildung 76 stellt die Verbrauchssummen, aufsteigend sortiert dar, wobei in einer zusätzlichen Variante der Besetzungsgrad durch zufällige Ein- und Ausstiege von Fahrgästen und damit die Nutzlast während der Fahrt (wie in Abbildung 73 beispielsweise dargestellt) zufällig variiert, aber innerhalb der MC-Variation konstant gehalten wurde.

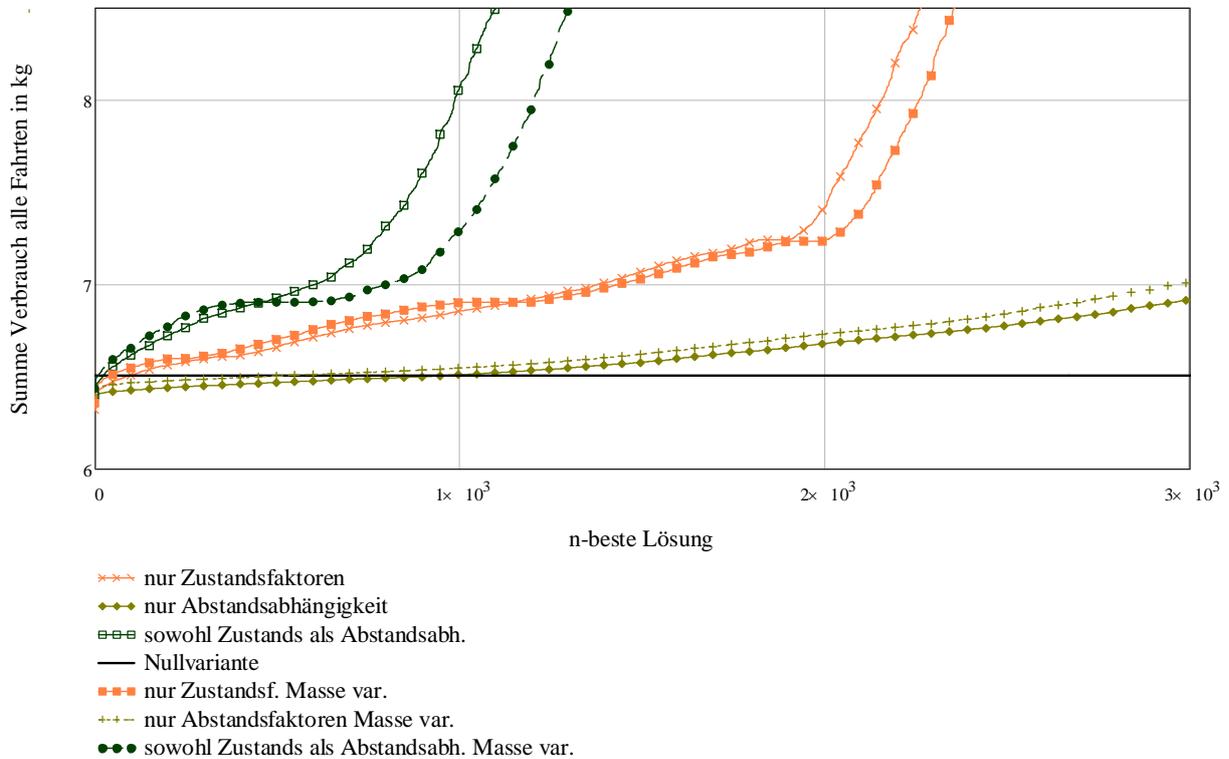


Abbildung 76: Sortierte Ergebnisse der MC-Variation mit Summe der Verbräuche für Varianten mit und ohne Einfluss des Abstandes beziehungsweise der Einfluss der Zustandsfaktoren

Abbildung 76 zeigt eine unterschiedliche Charakteristik der Verläufe der aufsteigend sortierten Verbräuche für die 3000 besten Varianten. Die nur vom Abstand abhängigen Lösungen haben einen sehr flachen Verlauf. Sie sparen bereits ab ca. der 1000.-besten Lösung gegenüber der eingezeichneten Nullvariante, bei der die SOC-Grenzen konstant gehalten werden, ein und werden erst bei mit den allerbesten Varianten mit Berücksichtigung der Zustandsfaktoren unterboten. Darüber liegen Varianten, wo nur die Einflüsse der Zustandsfaktoren Berücksichtigung finden, und die auch die beste Lösung stellen, jedoch erst bei den allerbesten Lösungen. Als Erklärung kann angeführt werden, dass bei Variation vieler Faktoren von Einflussgrößen in der ex-post Betrachtung der Fahrten über eine MC-Variation immer ein besserer Wert nahe des Optimums ermittelt werden kann als bei Variation von Faktoren, die den Einfluss des Abstandes abbilden, der nicht direkt auf die Verluste bzw. Verbräuche wirkt. Dieses über die Einflüsse der Zustandsfaktoren bestimmte Optimum ist allerdings singular und kleine Änderungen bei den Randbedingungen führen bereits zu Lösungen, die höhere Verbräuche zeigen als bei Berücksichtigung des Abstandes. Daher steigt die Kurve mit den Varianten, bei denen nur die Zustandsfaktoren variiert wurden, bereits für die dem Optimum folgenden Varianten über die Kurve mit den Varianten, wo der Abstandseinfluss berücksichtigt wurde. Hinsichtlich der Sensibilität schneiden die Lösungen mit kombiniertem Einfluss von Abstand und Zustandsgrößen am schlechtesten ab.

In Abbildung 76 sind auch die Auswirkungen einer schwankenden **Nutzlast** sichtbar. Es kommt bei den Ergebnissen mit Einfluss der Zustandsfaktoren, bei während der Fahrt schwankender Nutzlast, eine Welligkeit der aufsteigend geordneten Verbräuche hinzu, die Kurven haben im Bereich der besten Lösungen einen ähnlichen Verlauf wie bei konstanter Nutzlast. Bei der Berücksichtigung nur des Abstandseinflusses werden bei variabler Nutzlast etwas höhere Verbräuche erzielt, die Kurven verlaufen aber parallel und werden erst von den allerbesten Lösungen mit Zustandseinfluss unterboten.

11.2.3.2 VALIDIERUNG ANSATZ 2: ÜBERTRAGUNG DER OPTIMALEN LÖSUNG EINER TEILMENGE AN FAHRTEN AUF ALLE FAHRTEN

Beim zweiten Ansatz der Validierung wurde nur eine Teilmenge der Fahrten für die Bestimmung der optimalen Einflussfaktoren mittels MC-Variation herangezogen und dann mit diesen Einflussfaktoren alle Fahrten durchgerechnet. Abbildung 77 zeigt wie der optimale Verbrauch beim Subset an Fahrten mit dem für alle Fahrten berechneten Verbrauch korreliert. Zusätzlich wurde auch die Standardabweichung für den Verbrauch bei der Teilmenge mit dem Verbrauch bei allen Fahrten korreliert.

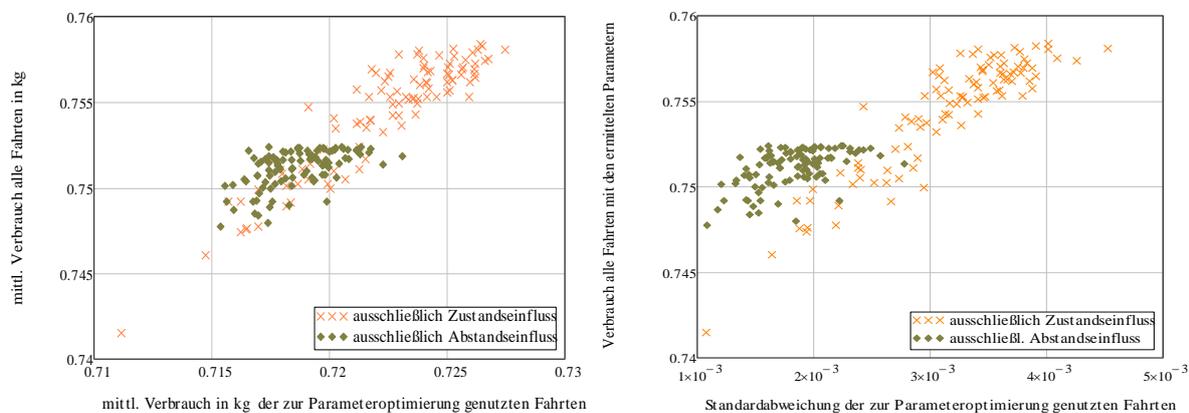


Abbildung 77: Korrelation der Ergebnisse für eine Teilmenge von 5 Fahrten mit den Ergebnissen für alle neun Fahrten und denselben Faktorensätzen für 101 von 100.000 Variationen

Abbildung 77 zeigt, dass Lösungen die bei der Teilmenge geringe Verbräuche hervorbringen, tendenziell auch niedrigere Verbräuche bei allen Fahrten bewirken. Eine geringere Standardabweichung der Verbräuche bei der für die Optimierung genutzten Teilmenge ist für den Verbrauch bei allen Fahrten hilfreich. Die ausschließliche Nutzung des Abstandseinflusses hat dabei eine geringere Korrelation, d. h. sie erlaubt auch bei großen Streubreiten im Verbrauch bei der für die Optimierung benutzten Teilmenge, eine vorteilhafte Übertragung des Ansatzes zur SOC-Modulation auf die Gesamtmenge. Die Berücksichtigung des Abstandseinflusses führt zwar nicht zu den besten Lösungen, kann damit aber als robuster betrachtet werden.

11.2.4 VERGLEICH MIT EINER ALTERNATIVEN REGELUNG DES MOTOR-GENERATOR-SATZES

Um die Qualität des gewählten Regelungsansatzes für den Stromerzeuger zu beurteilen, wurde auch eine Lösung mit modulierender Leistung des Motor-Generator-Satzes implementiert. Die Leistung des Motor-Generator-Satzes ändert sich dabei beim Lastfolgeansatz linear mit dem SOC des EDLC. Abbildung 78 vergleicht den Verlauf des Speicherinhaltes (SOC) und den Einsatz des Motor-Generator-Satzes für die Hystereseregulierung (On-Off) und den modulierenden Betrieb (Lastfolger = *Load-Follower*). Bei der modulierenden Lösung kommt es zu häufigeren Starts des Motor-Generator-Satzes und damit der VKM, weil bei der Hystereseregulierung und ausreichender Energiespeichergroße eine hohe Leistungsanforderung des Antriebs nicht unmittelbar einen Start des Motor-Generator-Satzes auslöst.

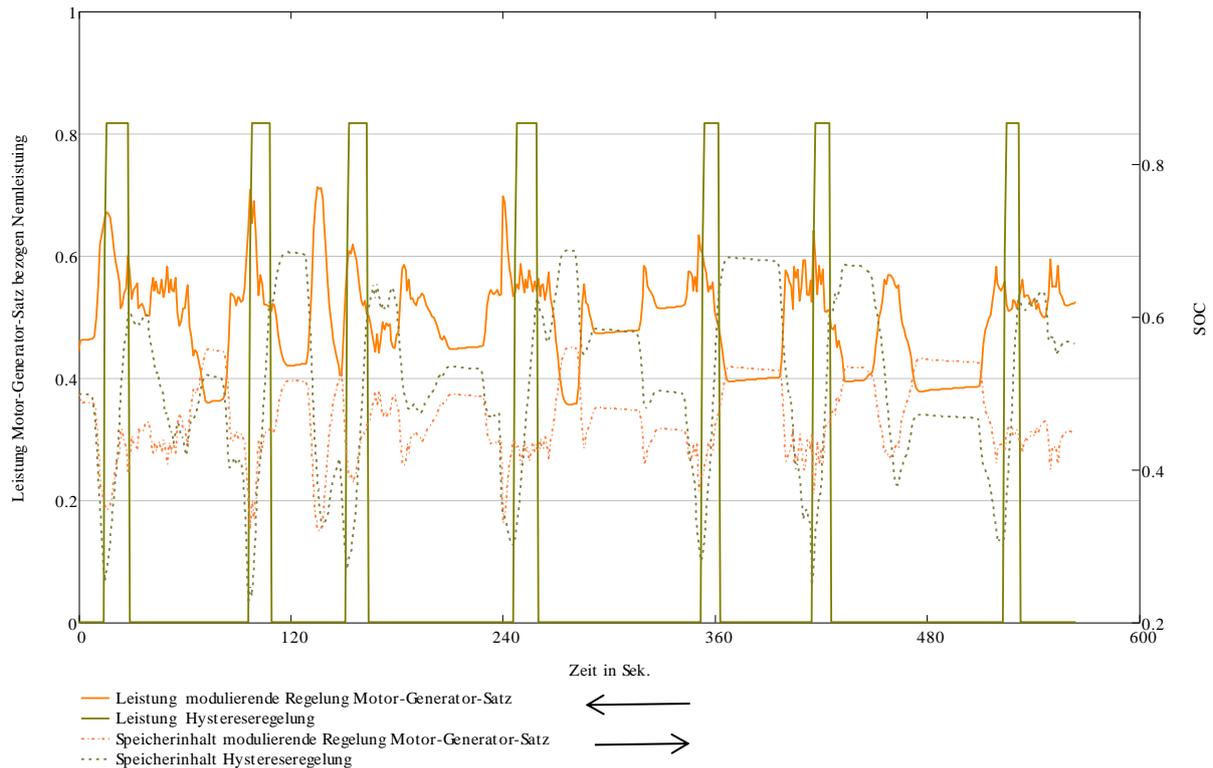


Abbildung 78: Darstellung des Verlaufs von SOC- und Motor-Generator-Satz-Einsatz über die Zeit für Hysterese und modulierende Regelung des Motor-Generator-Satzes

Der Verbrauch der Lastfolge-Regelung liegt hier beim selben physikalischen Setting des Fahrzeugantriebes, und ohne von Zustandsfaktoren oder Abständen abhängige Optimierung beider Varianten, rund 5 % über dem Verbrauch der Hysterese-Regelung. Die Gültigkeit dieses Ergebnisses muss insofern eingeschränkt werden, als die für die Hysterese-Regelung optimierte Abstimmung Generator-VKM für eine Lastfolge-Regelung möglicherweise ungünstig ist. Es wird für die Lastfolge-Lösung u.U. möglich sein den Verbrauch weiter zu senken. Wenn die hier für die Hysterese-Regelung entwickelten Optimierungsverfahren auf den Lastfolge-Betrieb übertragen werden, können die Einflussfaktoren zur Modulierung der Last benutzt werden. Die niedriger bleibenden Wirkungsgrade der VKM bei Teillastbetrieb stellen aber unverändert einen Nachteil der Lastfolgeregelung dar.

11.3 STABILITÄT UND SENSIBILITÄT

11.3.1 STABILITÄT DES GEFUNDENEN OPTIMALEN ANSATZES

Der Monte Carlo Ansatz erlaubt durch die Vielzahl der simulierten Lösungen eine statistische Auswertung von Detailergebnissen der Berechnungen. Mit der **Analyse der Standardabweichungen der Verbräuche und Verluste** könnten mögliche Probleme durch Abweichungen oder Fehler in der Simulation aufgedeckt werden, die die Validität der Aussagen gefährden. Tabelle 28 zeigt die relative Standardabweichung der in der Simulation berechneten Energieverluste bei den gültigen Ergebnissen der MC-Variation.

Tabelle 28: relative Standardabweichungen der Ergebnisse/Energieströme

Bezeichnung	relative Standardabweichung gültige Ergebnisse der MC- Variation
Verbrauch	0,093
Summe elektrische Verluste	0,073
Rekuperierte Energie Antriebsmaschine	0,139
Energiebedarf Elektroantrieb	0
Leckagestrom EDLC	0,121
Ohmsche Verluste EDLC	0,349
Verluste bzw. Anzahl Starts Motor-Generator-Satz	0,79
elektrische Energie Motor-Generator-Satz	0,114
elektrische Rekuperation in EDLC	0,14
Differenz Energieinhalt EDLC vor/nach der Fahrt	2,349

In Tabelle 28 sticht die große relative Standardabweichung für den Energieinhalt im EDLC vor und nach der Fahrt heraus. Dies liegt daran, dass kein Ausgleich während der Fahrt geschaffen wurde. Es entspräche nicht der Realität, mittels eines zusätzlichen Algorithmus, welche Differenzen im Energieinhalt zwischen Start und Ende der simulierten Fahrtstrecke zu minimieren, die nur einen Teil der Gesamtstrecke ausmacht. Stattdessen wurde nach der Simulation eine Energiebilanz aufgestellt. Die Unterschiede im Energieinhalt im EDLC vor und nach der Fahrt werden nach Formel 20 bei der Berechnung des Kraftstoffverbrauches (bzw. der elektrischen Verluste und Emissionen) korrigiert, und sie gefährden damit die Gültigkeit der Aussagen nicht signifikant.

Der hohe Wert für die relative Standardabweichung der Starts des Motor-Generator-Satzes erfordert ebenso Aufmerksamkeit. Der Einfluss der Abweichungen bei der Zahl der Starts des Motor-Generator-Satzes ist, infolge des geringen dafür erforderlichen Energieaufwandes bei wenigen Starts, klein, kann aber bei sehr vielen Starts relevant werden. Aus den vorgenannten Gründen wurde eine Begrenzung der Anzahl der Starts durchgeführt (siehe Kap. 11.4). Bei den Verlusten des Elektroantriebs tritt richtigerweise keine Streuung auf, da es sich um durch die Fahrkurven vorgegebene Werte handelt, die durch die MC-Variation nicht beeinflusst werden. Größere Abweichungen treten bei den Ohmschen Verlusten auf. Dies weist auf eine stark unterschiedliche Zuordnung von EDLC-Spannung und Motor-Generator-Satz-Betrieb hin, und unterstreicht die Notwendigkeit, nicht nur die Differenz des Energieinhalts vor und nach der Fahrt im EDLC auszugleichen, sondern auch die indirekten Folgen zu berücksichtigen. Die anderen relativen Standardabweichungen zeigen keine Auffälligkeiten, die untersucht werden müssten.

Es kann die Hypothese aufgestellt werden, dass die Qualität des taktischen Energiemanagements mit Modulation der Schaltgrenzen der Hystereseregulierung über die **Stabilität der Lösungen bei den simulierten 9 Fahrkurven** ausgedrückt werden kann. Daher wurde die Varianz der Verbräuche der 9 berechneten Einzelfahrten zum geringsten Verbrauchswerte der Fahrt mit der Summe des Verbrauchs für alle Fahrten in Abbildung: 79 korreliert.

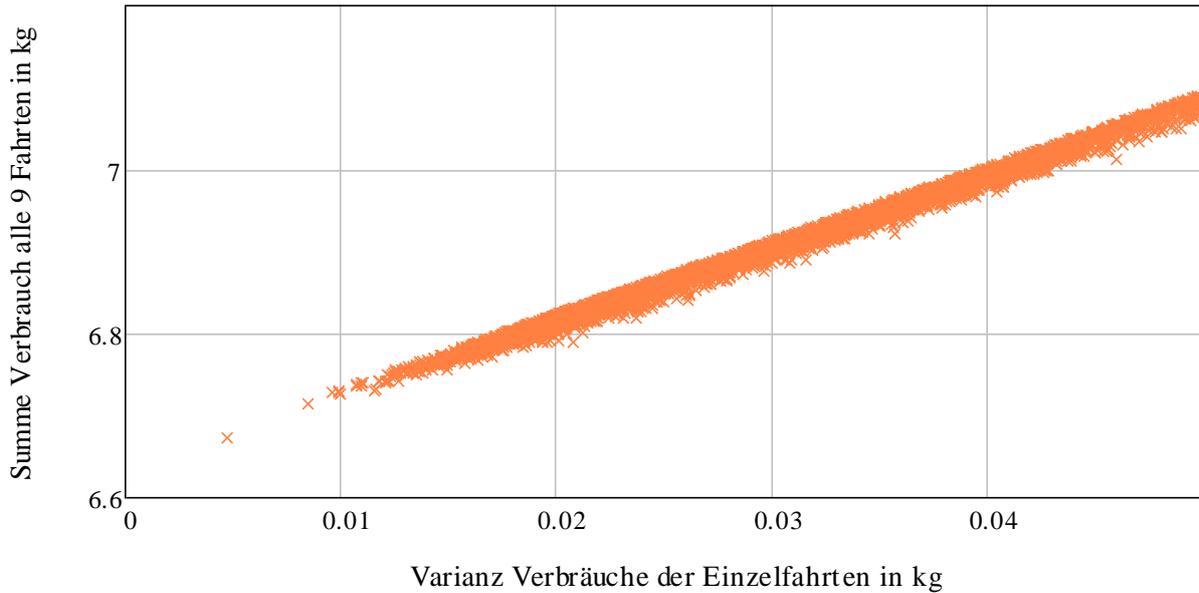


Abbildung 79: Korrelation Verbrauchssummen-Varianz der Verbräuche für die unterschiedlichen Fahrten 200.000 Varianten, variable Masse

Die besten Gesamtlösungen treten bei kleinerer Variabilität der Verbräuche der 9 berechneten Fahrten auf, also bei größerer Ähnlichkeit der Verbrauchswerte.

Es muss auch überprüft werden, ob die **SOC-Korrektur**, die durch die unterschiedlichen Speicherinhalte vor und nach der Fahrt notwendig wird, ggf. die Ergebnisse unzulässig beeinflusst. Links in Abbildung 80 werden die Verbräuche und Verluste der Einzel-Fahrten dargestellt und rechts die Summenwerte über alle Fahrten.

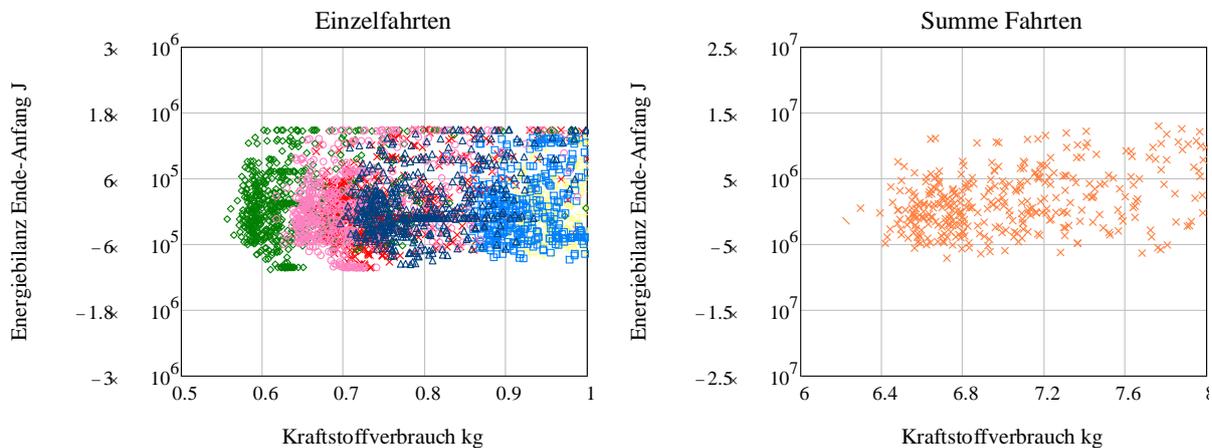


Abbildung 80: Korrelation Kraftstoffverbrauch und Energiebilanz Speicher vor- und nach der Fahrt, gemeinsam und getrennt für die Fahrten, konstante Masse

Aus der Darstellung der Energiedifferenz zwischen Ende- und Anfang der Fahrt ist bei den Einzelfahrten eine breite Streuung zu sehen. Bei der Summe der neun Fahrten ist bei den Lösungen mit geringen Verbräuchen die Stichprobe klein, aber es wird Abbildung 80 sichtbar, dass gute Lösungen keine extremen Abweichungen bei der Energiedifferenz vor- und nach der Fahrt haben. Die gewählte (und in Formel 25 beschriebene) Methode der Korrektur stellt aber natürlich nur eine Annäherung an die Realität dar, da abweichende SOC während der Fahrt zu nichtlinearen Änderungen bei den Verlusten und der rekuperierbaren Energie führen.

11.3.2 SENSIBILITÄT IN BEZUG AUF DIE DATENQUALITÄT DER POSITIONSDATEN

Zuletzt soll untersucht werden, ob Abweichungen bei der Datenqualität einen Einfluss auf die Aussagen haben. Die Positionsdaten der Busse wurden mittels GPS ermittelt, hier ist durch die Messungen ein Fehler bereits inkludiert. Die odometrische Bestimmung der Position über den von der Position abgeleiteten Weg würde Fehler durch die zweimalige Integration kumulieren, daher wurde nicht die Positionen, sondern die Geschwindigkeit aus den Daten des GPS-Empfängers für die Ermittlung des Weges verwendet. Da auf den Weg bezogene Abstände für das taktische Energiemanagement benutzt werden, entstehen bei ungenauen Positionsdaten Fehler im taktischen Energiemanagement. Die Varianten der Bestimmung der Abstände des Fahrzeuges zu den potentiellen Zwangshalten werden in Tabelle 29 mit einer Analyse der Konsequenzen dargestellt:

Tabelle 29: Varianten der Bestimmung der Abstände zu den potentiellen Zwangshalten

Lokalisierung/Abstand	GIS-Verortete Zwangshalte	Odometrische Abstände, entsprechend messtechnisch erfassten Strecken
Odometrische Positionsbestimmung	größere Fehler bei Abweichungen von der idealen Fahrlinie, Zuordnung von Position zu Fahrlinie nötig	unbekannte zukünftige Fahrlinie und größere Fehler durch bisherige möglich Abweichungen
GPS-Position	geringer Fehler abhängig von Zahl und Höhe der Satelliten, aber nur Luftlinienabstand berechenbar	beste Lösung, wenn eine haltbare Prognose für die zukünftige Fahrlinie vorliegt

Bei der retrospektiven Simulation wäre es möglich die tatsächlichen Abstände zu den Zwangshalten zu bestimmen, wie sie sich aus den odometrischen Daten ergeben. Eine konstante Fahrlinie ist auch bei hoher Genauigkeit der GPS-Werte nicht erzielbar, da kleine Umwege und Abweichungen auftreten z. B. verschiedene Kurvenradien bzw. die Benutzung unterschiedlicher Fahrspuren. Im betrachteten Fahrtsegment kann eine odometrische Bestimmung der Abstände als hinreichend genau gesehen werden und über diese die Abstände zu fest verorteten potentiellen Zwangshalten bestimmt werden.

Dadurch, dass die GPS-Daten nur alle Sekunden vorlagen, ergibt sich eine **Granularität** (zeitliche Auflösung übersetzt in eine räumliche Auflösung bei den Abständen). Es ist zu überprüfen ob dadurch ein kritischer Einfluss auf die Modulation der Hystereseregulung über die Abstände zu den potentiellen Zwangshalten vorhanden ist, besonders in Situationen mit hoher Fahrtgeschwindigkeit direkt vor potentiellen Zwangshalten. Eine Verschiebung des potentiellen Zwangshaltes (über δx in Formel 28) in Richtung Fahrzeugposition brachte bei der Simulation geringere Verbräuche und kann daher als notwendig gesehen werden um der Granularität zu begegnen (siehe auch Abbildung 83). Besser wäre eine Extrapolation der Position des Busses, wobei jedoch der Genauigkeitsgewinn als gering betrachtet werden kann, da der in die SOC-Modulation eingehende Abstand eine gewichtete Summe aller potentiellen Zwangshalte innerhalb von 500m ist (siehe Formel 28).

Eine weitere Frage lautet, wie sich die Ergebnisse ändern, wenn es eine **Abweichung** zwischen den ermittelten Positionsdaten und der tatsächlichen Position gibt. Wenn nicht der über die Geschwindigkeit berechnete Weg, sondern das GPS-Signal zur Positionsbestimmung genutzt wird, muss eine Referenz für den Pfad (Weg) vorhanden sein, worauf das GPS-Signal bezogen werden kann. Dies ist, solange keine Geschwindigkeit abgeleitet wird, über eine Berechnung des Abstandes zu den einzelnen Punkten des Pfades möglich. Zur Beschleunigung der Suche des nächstgelegenen Punktes am Pfad kann folgender Algorithmus nach Tabelle 30 benutzt werden.

Tabelle 30 Algorithmus für die Suche des der Position nächstgelegenen Punktes am Pfad der Fahrtroute

- Suche nach Pfadelementen mit identem x- oder y-Wert zur Position.
- Auswahl der x oder y-Achse über den Abstand zum so gefundenen Pfadelement.
- Benutzung des Gradientenverfahrens mit der Nutzung des Abstandes zur Position als Indikator für die Qualität der Lösung.

Für die Simulation einer Ungenauigkeit bei der Positionsbestimmung wurde für die Untersuchung folgender Ansatz gewählt. Es wurde die odometrische Position zufällig und maximal um die vom GPS Gerät im GGA RMC Paket (Zeichenstring) rückgemeldete *Horizontal Dilution of Precision* (HDOP) verändert, die die Streubreite der GPS-Positionswerte angibt. Dabei wird um die absolute HDOP zu ermitteln der gemessene Mittelwert für die HDOP (1,6) mit dem RMS-Wert für die Genauigkeit multipliziert, die mit 10 m angenommen wurde. Abbildung 81 zeigt die Werte für die HDOP zeitlich geordnet für alle GPS-Messwerte einer Fahrt.

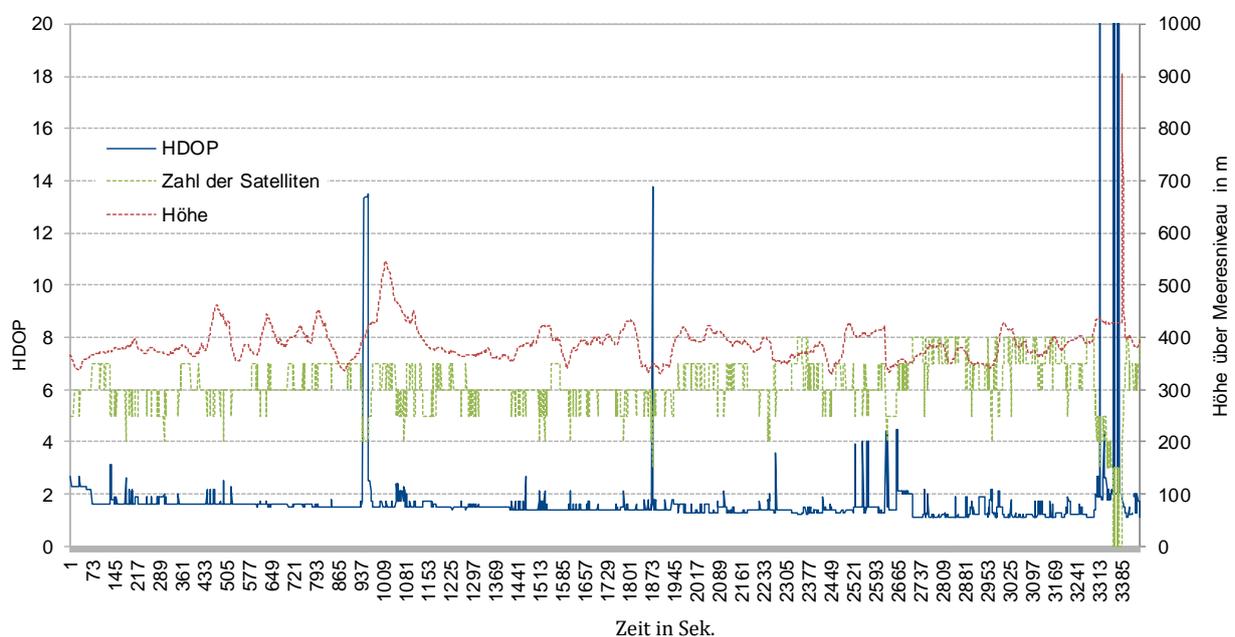


Abbildung 81: Verlauf der GPS-Werte für die horizontalen Abweichungen (HDOP) und für die Höhe für eine Messfahrt über die Zeit

Am Ende der Aufzeichnung (beim und nach dem Aussteigen aus dem Bus) waren bei der Aufzeichnung in Abbildung 81 keine Satelliten mehr sichtbar wodurch das HDOP sprunghaft ansteigt. Die Genauigkeit der horizontalen Position ist aber bis auf wenige Positionen sehr gut. Damit kann der Abstand zu fixen Zwangshalten ausreichend genau ermittelt werden.

Die Höheninformationen sind jedoch aufgrund der starken Schwankungen bei der Fahrt auf ebener Strecke nicht nutzbar (siehe Abbildung 81) um Steigungen auf der Strecke zu detektieren. Für variable (potentielle) Zwangshalte wie Stauenden ist ein höherer Fehler bei der Bestimmung des Abstandes zu diesen zu erwarten, da sie als fix angenommen wurden.

Es soll im Folgenden ein Beispiel simuliert werden, bei dem potentielle Stauenden vor Lichtsignalanlagen LSA nicht berücksichtigt werden, wenn der Bus offensichtlich freie Fahrt hat. Diese zusätzlichen Informationen bedeuten einen Übergang von einer Regelung, die mit Wahrscheinlichkeiten rechnet, hin zu einer Regelung die mit realen Angaben z. B. Informationen vom **Kreuzungsrechner** arbeitet. Abbildung 82 zeigt den ermittelten gewichteten Abstand zu

den Zwangshalten für unveränderte und maximal (entsprechend Formel 28) in Richtung des Fahrzeuges verschobene Zwangshalte und zum Vergleich die gemessene Geschwindigkeit. Als reale Abstandsfaktoren werden solche bezeichnet, die die tatsächlichen Halte bei der simulierten Fahrt berücksichtigen. Konkret wurde dies so implementiert, dass die potentiellen Zwangshalte entfernt wurden, wo die Geschwindigkeit nicht unter 15 km / h sinkt.

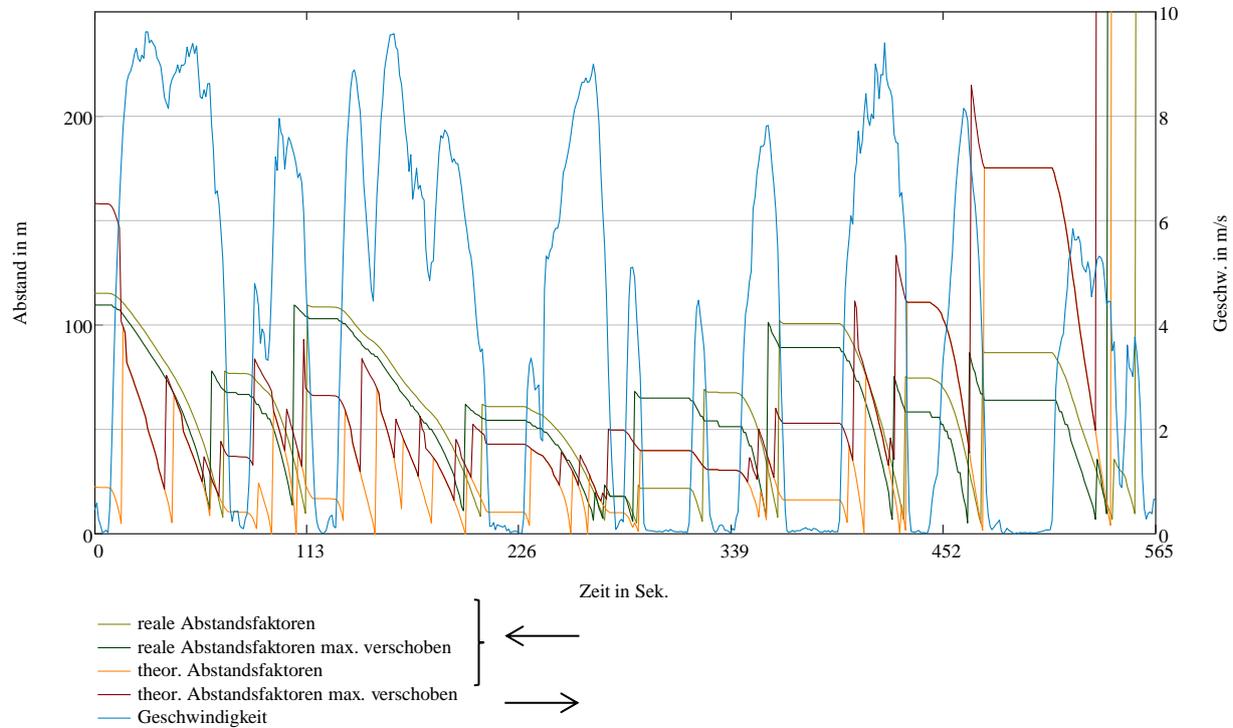


Abbildung 82: Darstellung der berechneten „realen“ und theoretischen kumulierten Abstände zu den Zwangshalten und der Geschwindigkeit des Fahrzeuges zum Vergleich

Die Untersuchung hat auch Konsequenzen für die Wahl der Algorithmen bei der automatischen Entdeckung von Zwangshalten. Abbildung 82 zeigt, dass die Wahl der Geschwindigkeit für die Erkennung eines Zwangshaltes für das Ergebnis wesentlich ist. Niedrige Geschwindigkeiten für die Erkennung der Zwangshalte, erlauben keine Detektion von Verzögerungen. Theoretische Abstandsfaktoren auf der Basis der Abstände zu den potentiellen Zwangshalten haben den Vorteil, dass mehr Beinahe-Zwangshalte erkannt werden. Die Berechnung von 50.000 Varianten mit Einfluss des Abstandes auf die SOC-Grenzen hat keine Unterschiede in Bezug auf das mit der MC-Variation erzielbare Minimum für die Verbrauchssumme gebracht.

Um den Einfluss einer konstanten Abweichung der GPS-Position zu ermitteln, wurde die Verschiebung der Position des Buses zu den Zwangshalten variiert. Abbildung 83 zeigt die Ergebnisse der Verschiebung für die Einflussfaktoren der durch die MC-Variation ermittelten drei besten Lösungen.

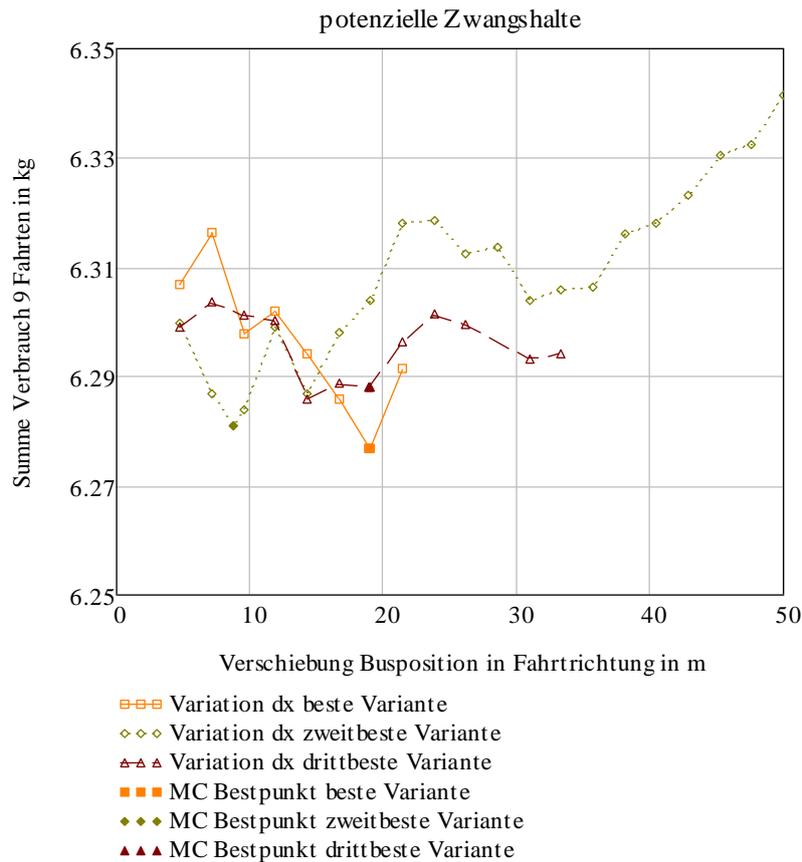


Abbildung 83: Verbrauch bei der variablen Verschiebung hin zu den potentiellen Zwangshalten, fixe Busmasse

Die MC-Variation, die die Verschiebung der Busposition (und damit die Abstände zu den potentiellen Zwangshalten) automatisch mit variiert, findet in zwei der drei Fällen das Minimum, bei der Varianten mit dem drittbesten Ergebnis liegt die MC-Variation geringfügig über dem durch die Variation des Abstandes gefundenen Minimum. Die optimale Verschiebung beträgt nach Abbildung 83 ca. 10 m bzw. ca. 20 m.

Die niedrigeren Summen für die Verbrauchsdaten bei konstanter Verschiebung des Abstandes zum potentiellen Zwangshalt in Richtung Fahrzeugposition unterstreicht die bereits gefundene Nützlichkeit einer früheren Erkennung von Zwangshalten. Bei der Simulation wahrer Zwangshalte ist es besser eine größere Verschiebung der potentiellen Zwangshalte in Richtung Fahrzeug vorzunehmen, das erzielbare Verbrauchsminimum ändert sich jedoch kaum. Die Erkennung von mehr Zwangshalten beziehungsweise die Erhöhung der Einflussfaktoren für die Modulation der Schaltgrenzen, die mit der Verschiebung einhergeht, verbessert also das Ergebnis, wobei eine Korrektur von zumindest 5 m durch die Position des GPS-Empfängers im Bus erwartet werden kann.

11.3.3 SENSIBILITÄT IN BEZUG AUF DIE ERFORDERLICHE ENERGIE FÜR NEBENAGGREGATE

Im Folgenden wurde bei der MC-Simulation eine konstante Energiemenge bezogen auf die elektrische Einspeisenennleistung des Motor-Generator-Satzes zum Abzug gebracht. Aufgrund von Restriktionen in Bezug auf den Programmspeicher, konnten nur 50.000 Variationen für drei Szenarien durchgerechnet werden. In Abbildung 84 werden die Summenverbräuche für die Szenarien und Varianten nach ihrer Höhe gereiht dargestellt.

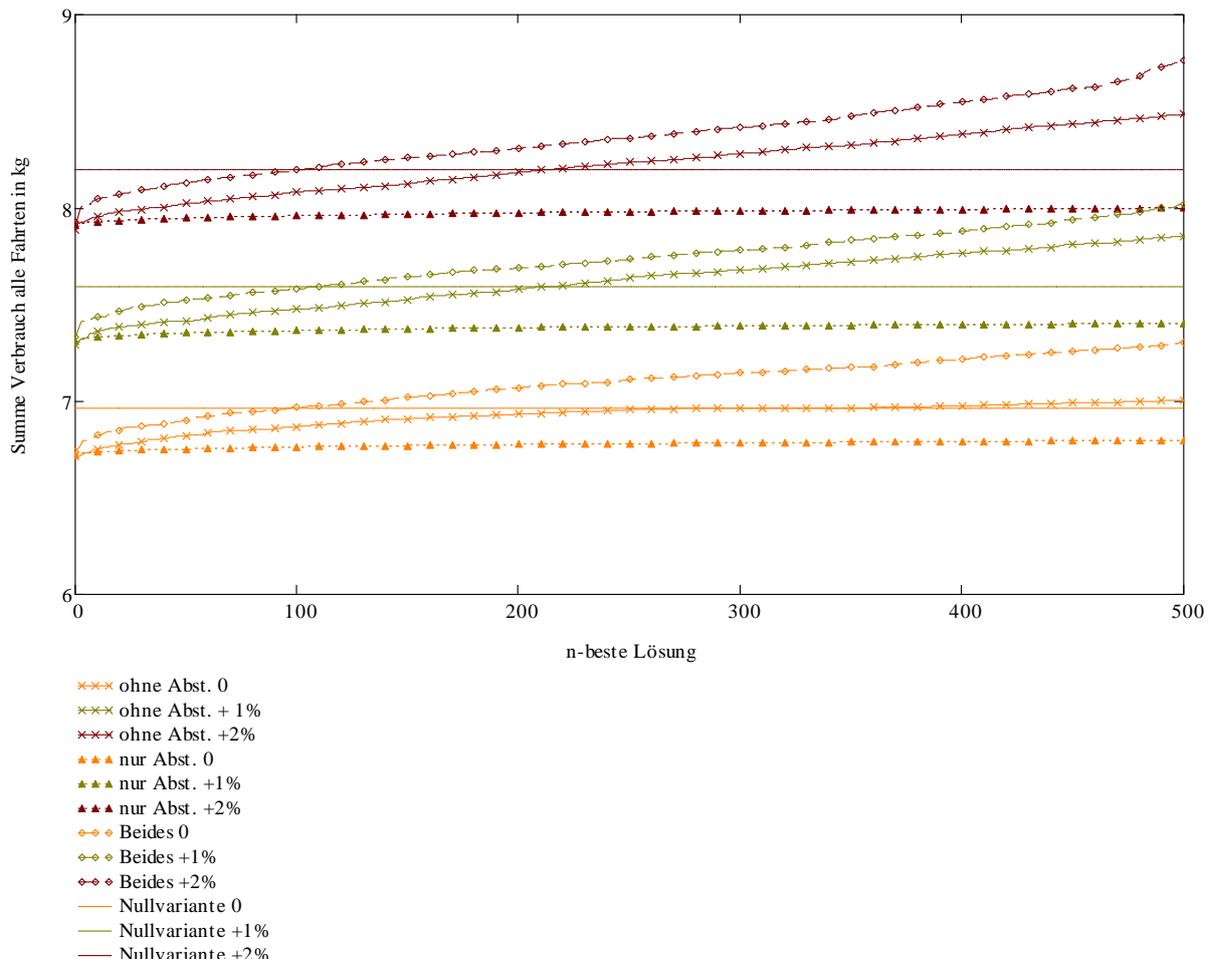


Abbildung 84 Gereichte Ergebnisse für unterschiedliche Modulationsverfahren bei Variation des Energiebedarfs für Nebenaggregate in Prozent der elektrischen Generatornennleistung.

Unter den besten Varianten in den Szenarien mit unterschiedlichem Energiebedarf für Nebenaggregate kommen, besonders bei Nutzung von Zustandsfaktoren, gleiche Varianten für die Einflussfaktoren vor⁹. Bei Nutzung des Abstandseinflusses ist dies im geringeren Umfang der Fall, dies ist jedoch auch dadurch bedingt, dass die Varianten sich im Verbrauch nur geringfügig unterscheiden. Es ist daher in beiden Fällen ein Einfluss des Energiebedarfs für Nebenaggregate gegeben, der auch bei der Wahl der Parameter berücksichtigt werden kann, aber ohne große Einbußen auch vernachlässigt werden kann.

11.4 ERFORDERLICHE EINGRENZUNGEN DES ERWÜNSCHTEN LÖSUNGSRAUMS

Die zufällige Variation der Einflussfaktoren nach Liste in Kap. 14.1 hat teilweise auch zu Lösungen geführt, die auffällig sind. Bei einer Darstellung der Verbrauchssumme über die Zahl der Starts des Motor-Generator-Satzes in Abbildung 84 wird sichtbar, dass die Verbrauchssumme der für eine bestimmte Zahl von Starts des Motor-Generator-Satzes besten Lösung zuerst mit der Zahl der Starts abnimmt und nach einem Minimum ab ca. 60 Starts wieder leicht ansteigt um bei ca. 200 Starts wieder die Verbrauchswerte der Nulllösung zu erreichen.

⁹ Die zweitbeste Lösung bei der Nullvariante ist die beste Lösung bei den Varianten mit erhöhtem Energiebedarf für Nebenaggregate.

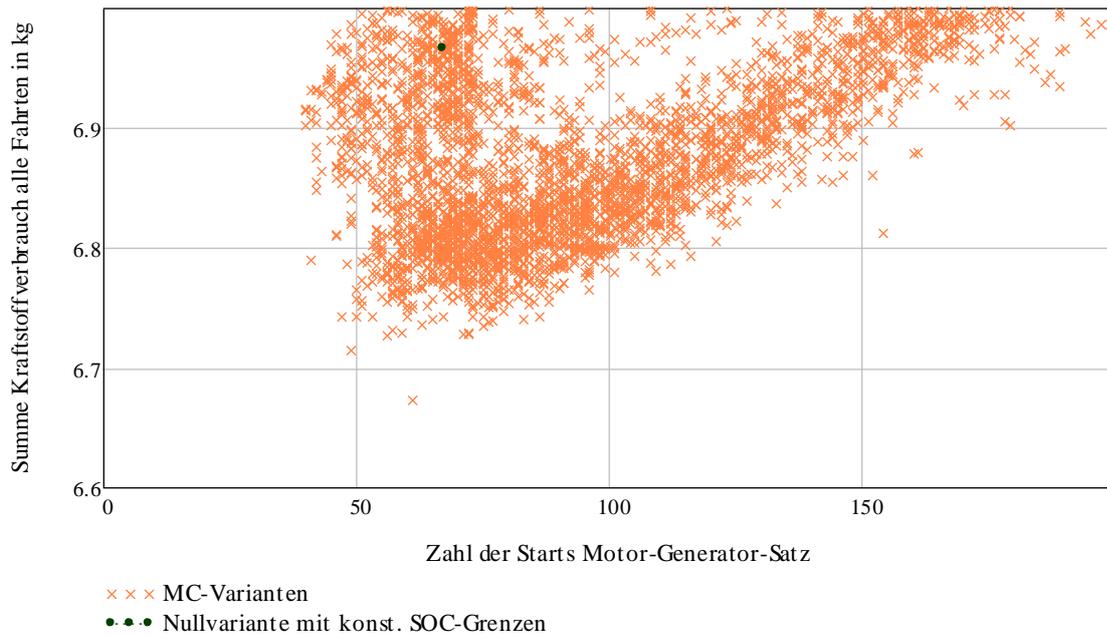


Abbildung 84: Darstellung der Summe der Verbräuche über die Gesamtsumme der Starts, variable Busmasse, 100.00 Varianten

Es wurde ein Ergebnis mit einer sehr hohen Zahl von Starts genauer untersucht. Dabei wurde eine Art **Pulsbreiten-modulierten Betrieb** des Motor-Generator-Satzes gefunden, von dem ein Ausschnitt in Abbildung 85 dargestellt ist.

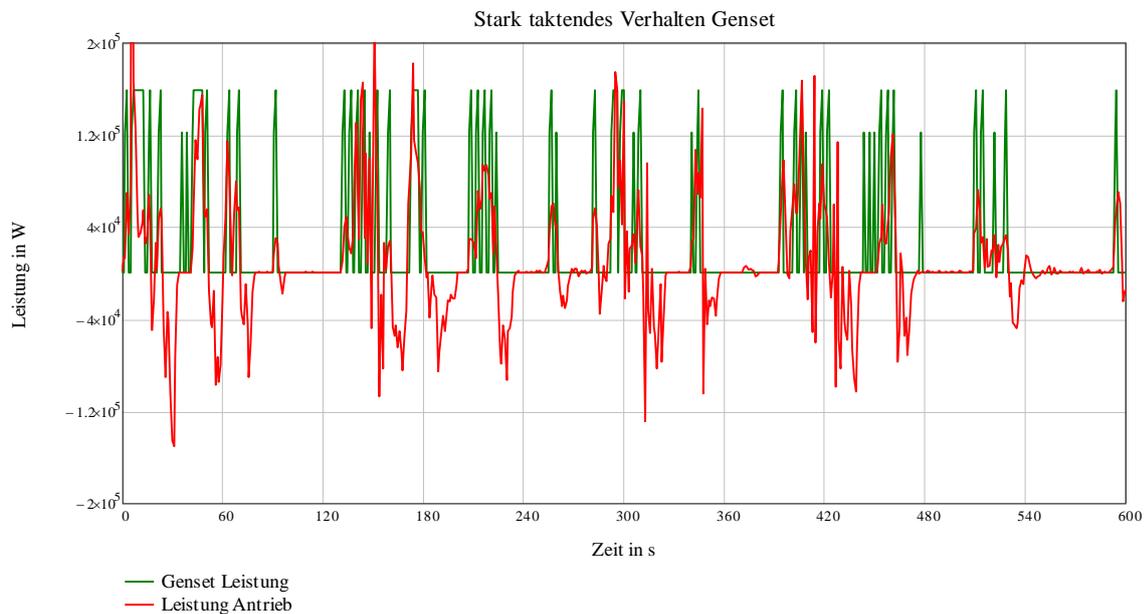


Abbildung 85: Motor-Generator-Satz Einsatz im Vergleich zum Leistungsbedarf des Antriebes bei hoher Zahl von Starts des Motor-Generator-Satzes

Je höher die erforderliche Antriebsleistung wird, desto höher wird in diesem Beispiel die Einsatzfrequenz des Stromerzeugers. Der Motor-Generator-Satz wird dabei auch teilweise mit Teillast betrieben, womit die häufigeren Ein-Aus Zyklen teilweise erklärt werden könnten. Eine diskrete schnelle Fourier-Analyse (FFT) hat eine Korrelation der Amplitudenverteilung des Summenverbrauchs mit der Einschalt-Frequenz des Motor-Generator-Satzes von ca. 0,6 ergeben. Diese hohe Zahl an Starts soll aus psychoakustischen Gründen (siehe Kap. 9.4.5) und möglichen negativen Auswirkungen auf die VKM vermieden werden und daher wird die Zahl der Starts auf in Summe 120 begrenzt.

12 AUSWERTUNG DER MC-SIMULATIONSERGEBNISSE UND ÜBERTRAGUNG IN DIE PRAXIS

12.1 EINLEITUNG

In Kapitel 12 werden alle Einflussfaktoren, die für die Modulation der SOC-Grenzen der Hystereseregulierung in Abbildung 47 eingesetzt werden, gemeinsam zufällig in einer *Monte-Carlo*-Simulation variiert. Die Beschreibung der in Abbildung 86 benutzten Indizes für die Einflussfaktoren findet sich in Kap. 14.1. Ziel der MC-Variation ist es dabei den Satz an Einflussfaktoren bzw. die Varianten der Beeinflussung der Schaltgrenzen der Hystereseregulierung zu ermitteln, die den geringsten Verbrauch für die **Gesamtheit der Testdaten** bewirken.

In weiterer Folge werden in diesem Kapitel die Konsequenzen der Optimierung auf die Emissionen und die Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Praxis anhand eines Entwurfs für eine Systemarchitektur diskutiert. Das *Mathcad*-Berechnungsdokument wurde dabei für die verfahrensspezifischen Untersuchungen, sowie Untersuchungen zur Stabilität und Sensibilität erweitert, wobei der Simulationskern beibehalten wurde.

12.2 DISKUSSION DER ERGEBNISSE DER GEMEINSAMEN VARIATION ALLER PARAMETER

Mit der Teststatistik für die Variation der Faktoren auf die Einflussgrößen nach Tabelle 27 wurden umfangreiche MC-Simulationen mit variabler Busmasse durchgeführt. Es wurden bis zu 200.000 Varianten bei der MC-Simulation berechnet, wobei durch den Zufallseinfluss Minima auch bei geringeren Stichprobengrößen auftreten können.

12.2.1 ERZIELBARE KRAFTSTOFFEINSPARUNGEN

Die Ergebnisse sind stochastischer Natur, je nach Stichprobengröße werden Lösungen mit unterschiedlicher Nähe zum Optimum ermittelt. Die Einsparungen gegenüber der Nullvariante werden daher in Abbildung 86 in einem Boxplot dargestellt. Es wurden dazu die dem Optimum nahekommenden Verbrauchsminima aus sechs MC-Variationen mit unterschiedlichen Stichprobengrößen benutzt.

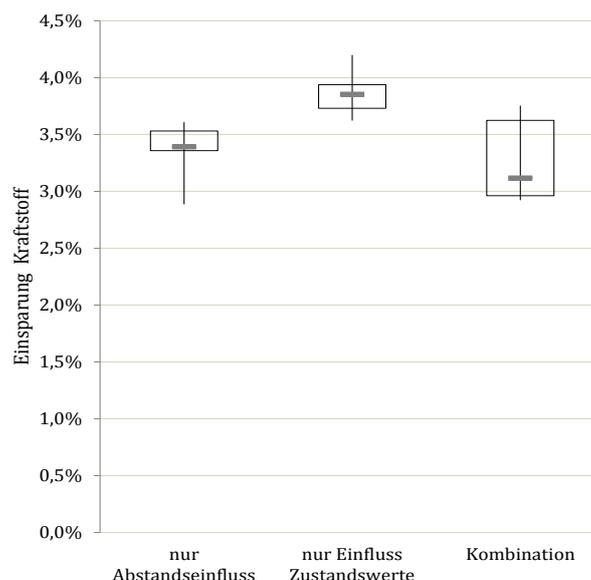


Abbildung 86 Boxplot mit Darstellung der Minima, Maxima und der mittleren zwei Quartile, sowie der Mediane der erzielten Einsparungen gegenüber der Nullvariante für variable Busmasse

Die größten Einsparungen werden beim ausschließlichen Einfluss der Zustandswerte mit ca. maximal 4,25 % erzielt, die Kombination beider Verfahren erzielt im Optimalfall die zweitbesten Lösungen, fällt jedoch beim Median auf den dritten Platz ab. Beim ausschließlichen Abstandseinfluss haben die mittleren Interquartilsbereiche um den Median die kleinste Ausdehnung. Als Erklärung kann dienen, dass beim Zustandseinfluss sich eine Optimierung genauer an spezifische Fahrten anpassen kann und damit wenige sehr gute Lösungen erzielt werden, während die Berücksichtigung des Abstandes unabhängig von den Fahrten weniger hohe, aber konstantere Einsparungen mit sich bringt (siehe Kap. 11.2).

Im Folgenden werden die Algorithmen für die SOC-Modulation für drei unterschiedliche Ergebnisse vorgestellt, die zu einer niedrigen, dem Optimum nahe kommenden, Verbrauchssumme über alle Fahrten führen. Die hier vorgestellten Ergebnisse sind zufälliger Natur, daneben existieren andere Lösungen mit geringfügig höherem Verbrauch. Die Ergebnisse sind nicht nur von den genutzten Testdaten, sondern auch der Charakteristik der Maschinen abhängig. Durch die Nutzung von neun Datensätzen und umfangreichen Sensibilitätsuntersuchungen (siehe Kap. 11.2) wurde versucht verallgemeinerbare Aussagen zu generieren. Eine Interpretation folgt im Anschluss durch Korrelation mit den Zustandsgrößen.

12.2.2 BEISPIELHAFTES ERGEBNIS DER MC-SIMULATION NUR ZUSTANDSFAKTOREN (OHNE ABSTANDSEINFLUSS) NAHE DEM OPTIMUM FÜR VARIABLE BUSMASSE

Formel 31 zeigt eine gefundene Lösung mit ausschließlichem Einfluss der Zustandsgrößen nach Formel 29, die sich nahe dem absoluten Optimum befindet, wie es bei einer sehr hohen Zahl an breit gestreuten Variationen mittels MC-Variation erreicht werden kann:

Formel 31: Formel zur Bestimmung der SOC-Korrektur über die Einflussfaktoren für eine Lösung nahe dem Optimum

$$SOC_{hi} = 0,8 + 0,574 \left(-0,292 \frac{\Sigma P_{EDLC}}{0,5 (P_{nGenS} + 0,5 P_{nEA})} + 0,507 \frac{W_{Sp}}{0,8 W_{EDLC}} \right)$$

$$\Delta SOC_{lo} = 0,2 - 0,767 \left(0,848 \frac{0,01 \Delta V_{GenS_{EDLC}}}{0,5 U_{nEDLC}} + 1,3 \frac{\Sigma P_{EDLC}}{0,5 (P_{nGenS} + 0,5 P_{nEA})} \right)$$

ΔSOC_{hi} ΔSOC_{lo} absoluter Beitrag zur Modulation der jeweiligen SOC-Grenze

ΣP_{EDLC} Nettotransferleistung vom/zum EDLC

P_{nGenS} Nennleistung Motor-Generator-Satz

P_{nEA} Nennleistung elektrische Antriebsmaschine

W_{Sp} aktueller Speicherinhalt EDLC

W_{EDLC} maximaler Speicherinhalt EDLC

$\Delta V_{GenS_{EDLC}}$ Betrag der Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Motor-Generator-Satz

U_{nEDLC} Nennspannung EDLC

Von den vier Einflussfaktoren, die getrennt für die beiden SOC-Grenzen benutzt werden, kommt in der vorgestellten Lösung nur die Laufzeit des Motor-Generator-Satzes nicht vor. Der komplexe Zusammenhang bei der Simulation mehrerer Fahrten erlaubt nur eine vorsichtige Interpretation dieser Ergebnisse. Eine hohe Nettotransferleistung vom/zum EDLC sollte die obere SOC-Grenzen senken, beim Einspeisen kann so eher ein Verwerfen von rekuperierter Bremsenergie vermieden werden. Der aktuelle SOC soll nach Formel 31 die obere SOC-Grenze heben. Durch die höheren Spannungen können die Stromstärken und damit die Ohmschen Verluste sinken. Beim Einfluss auf die untere (und die damit gekoppelte mittlere) SOC-Grenze sollen diese sowohl eine hohe Spannungsdifferenz als auch Nettotransferleistung vom/zum EDLC senken. Dies scheint paradox, aber es verlängert die Laufzeit und die Startverluste durch weniger Starts. Da die Spannungsdifferenz auch für den SOC steht, kann über die Formel 29 auch

ein hoher SOC die untere SOC-Grenze senken, was einer guten Ausnutzung des Energiespeichers gleichkommt. Eine große Nettotransferleistung führt ebenso zur Senkung der unteren SOC-Grenze. Das Ergebnis, wie auch die hohe Zahl an ungültigen Lösungen bei der MC-Variation, deutet darauf hin, dass bei der Lösung nach Formel 31 primär die bestmögliche Ausnutzung des Energiespeichers und damit Reduktion der verworfenen rekuperierbaren Bremsenergie im Vordergrund steht.

12.2.3 BEISPIELHAFTES ERGEBNIS MC-SIMULATION MIT ABSTANDSEINFLUSS NAHE DEM OPTIMUM FÜR VARIABLE BUSMASSE

In der zweiten Variante, wird eine Lösung mit ausschließlichem Abstandseinfluss auf die Schaltgrenzen vorgestellt. Zur Beeinflussung der oberen und unteren SOC-Grenzen anhand Formel 30 durch die Abstände wird die Ferne benutzt und die zum Wiederauffahren vorzuhaltende Energie.

Formel 32 Formel zur Bestimmung der SOC-Korrektur über den Abstand zu potentiellen Zwangshalten für eine Lösung nahe dem Optimum

$$SOC_{hi} = 0,8 + \left(1 - \frac{100 m}{100 m + a_{ZH}}\right) \frac{1,167 W_{vorh}}{W_{EDLC}}$$

$$SOC_{lo} = 0,2 + \left(1 - \frac{100 m}{100 m + a_{ZH}}\right) \frac{0,442 W_{vorh}}{W_{EDLC}}$$

SOC_{hi} SOC_{lo} obere untere Schaltgrenze
 a_{ZH} gewichteter Abstand von potentiellen Zwangshalten nach Formel 28
 W_{vorh} vorzuhaltende Energie im EDLC nach dem nächsten potenziellen Zwangshalt nach Formel 27

Diese Lösung nach Formel 32 erzielt im Vergleich zur Lösung in Formel 31 einen um 0,6 % höheren Wert beim Verbrauch. Die Erhöhung des Energieinhaltes im EDLC über die Größe der vorzuhaltenden Energie, verringert eine Unterdeckung und damit erforderliche ineffiziente Vollast des Stromerzeugers. Je kleiner der Abstand zum potentiellen Zwangshalt, desto geringer sollte nach Formel 32 dieser Einfluss werden. Damit wird eine vollständige Rekuperation von Bremsenergie erleichtert.

12.2.4 BEISPIELHAFTES ERGEBNIS MC-SIMULATION MIT EINFLUSS DER ZUSTANDSFAKTOREN UND DES ABSTANDES NAHE DEM OPTIMUM FÜR VARIABLE BUSMASSE

Zuletzt wird eine Lösung vorgestellt, wo beide Varianten der Modulation der Schaltgrenzen kombiniert werden.

Formel 33 Formel zur Bestimmung der SOC-Korrektur über Zustandsfaktoren und den Abstand zu Zwangshalten – Lösung nahe dem Optimum

$$\Delta SOC_{hi} = 0,8 + 0,39 \left(-0,281 \frac{t_{lauf}}{150 sec} - 1,078 \frac{0,01 \Delta V_{GenS_{EDLC}}}{0,5 U_{nEDLC}} - 0,755 \frac{\Sigma P_{EDLC}}{0,5 (P_{nGenS} + 0,5 P_{nEA})} + 1,423 \frac{W_{Sp}}{0,8 W_{EDLC}} \right) + \left(1 - \frac{100 m}{100 m + a_{ZH}}\right) \frac{1,681 W_{vorh}}{W_{EDLC}}$$

$$\Delta SOC_{lo} = 0,2 - 1,844 \left(0,188 \frac{t_{lauf}}{150 sec} + 1,602 \frac{0,01 \Delta V_{GenS_{EDLC}}}{0,5 U_{nEDLC}} + 1,212 \frac{\Sigma P_{EDLC}}{0,5 (P_{nGenS} + 0,5 P_{nEA})} - 0,215 \frac{W_{Sp}}{0,8 W_{EDLC}} \right) + \left(\frac{100 m}{100 m + a_{ZH}}\right) \frac{1,391 W_{vorh}}{W_{EDLC}}$$

ΔSOC_{hi} ΔSOC_{lo} absoluter Beitrag zur Modulation der jeweiligen SOC-Grenze
 ΣP_{EDLC} Nettotransferleistung vom/zum EDLC
 P_{nGenS} Nennleistung Motor-Generator-Satz

P_{nEA}	Nennleistung elektrische Antriebsmaschine
W_{Sp}	aktueller Speicherinhalt EDLC
W_{EDLC}	maximaler Speicherinhalt EDLC
ΔV_{GenS_EDLC}	Betrag der Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Motor-Generator-Satz
U_{nEDLC}	Nennspannung EDLC
t_{lauf}	aktuelle Laufzeit des Motor-Generator-Satzes seit dem letzten Start
a_{ZH}	gewichteter Abstand von potentiellen Zwangshalten nach Formel 28
W_{vorh}	vorzuhaltende Energie im EDLC nach dem nächsten potenziellen Zwangshalt nach Formel 27

Diese Lösung nach Formel 33, die mehr Einflussfaktoren benutzt um die Modulation zu optimieren, erzielt im Vergleich zur Lösung in Formel 31 einen um 0,2 % höheren Wert beim Verbrauch. Die Vorzeichen bei den auch in Formel 31 vorkommenden Einflüssen bleiben ident, und damit auch die Erklärungen. Über die entsprechende Berücksichtigung weiterer Zustandsgrößen ist es möglich Ferne durch Nähe beim Einfluss auf den unteren SOC zu ersetzen. Die neu hinzugekommene Laufzeit senkt die untere SOC-Grenze mehr als die obere, vergrößert also den Arbeitsbereich bei langen Laufzeiten und führt zu einer Selbstverstärkung bei der Laufzeitverlängerung.

12.2.5 KORRELATION DER ERGEBNISSE MIT DEN EINFLUSSGRÖßEN

Zur Interpretation der Ergebnisse wurden die Verbrauchssummen über die mittleren Zustandsgrößen in Abbildung 88 einzeln dargestellt, wobei hier auch Lösungen mit höheren Verbräuchen abgebildet sind, bei denen neben einem ineffizienteren Betrieb des Motor-Generator-Satzes auch rekuperierte Energie verworfen wird:

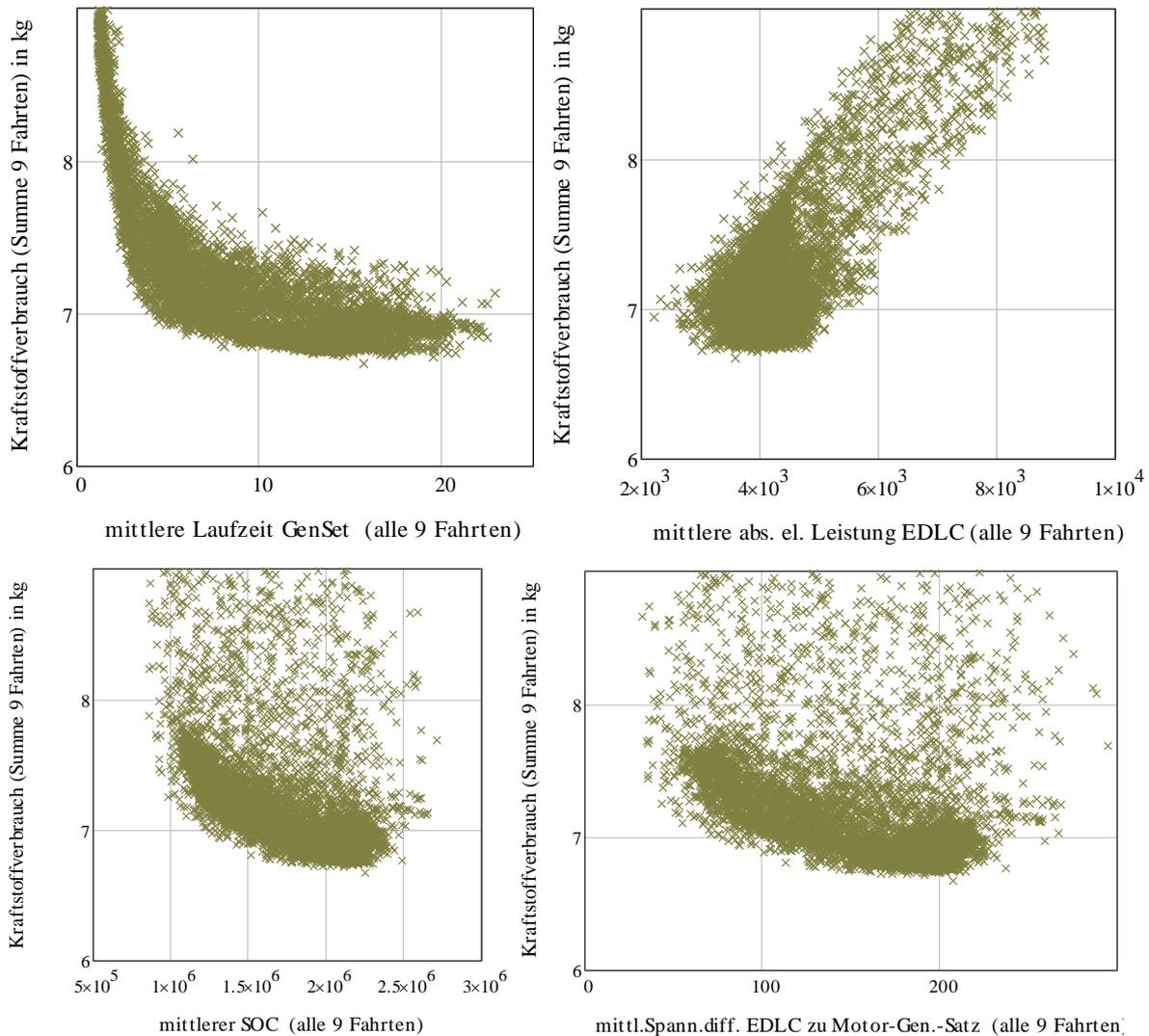


Abbildung 88 Korrelation der Verbrauchssumme mit den Einflussfaktoren für 100.000 gerechnete Varianten und variable Busmasse

Da die Starts zusätzlichen Energieaufwand erfordern, ist die negative Korrelation der Laufzeit mit dem Verbrauch in Abbildung 88 links oben nicht unerwartet. Laufzeiten rechts des relativ flachen Minimums führen durch den begrenzten Energieinhalt im EDLC zu einem Verwerfen von Energie und damit zu Mehrverbräuchen. Bei der Korrelation des Verbrauchs mit dem mittleren Speicherinhalt während der Fahrten in der Grafik links unten ist eine etwas unsymmetrische U-Kurve erkennbar. Die Leckage-Verluste des EDLC nehmen zwar mit dem Ladezustand und damit auch der Spannung zu, sind jedoch in der Höhe gering (siehe Abbildung 21). Jedoch sinken die Ohmschen Verluste bei höheren Spannungen. Bei einem zu hohen mittleren SOC steigt aber die verworfene Rekuperationsenergie, wodurch sich das Ergebnis schnell verschlechtert. Der Verbrauch, in der Grafik rechts oben dargestellt über die mittlere absolute elektrische Leistung vom bzw. zum EDLC, zeigt in einem kleinen Bereich einen sehr flachen Verlauf und rechts davon einen steilen Anstieg. Grund ist der mit der Stromstärke zunehmende Ohmsche Verlust, der durch die Überlagerung zwischen Einspeisung und Rekuperation auftritt. In der Grafik rechts unten in Abbildung 88, hat der Verbrauch bei mittlerer Spannungsdifferenzen zwischen EDLC und Motor-Generator-Satz ein flaches Minimum. Die Spannungsdifferenz hängt auch mit dem mittleren SOC zusammen, der hier den größeren Einfluss auf die Verluste hat, als die durch die Spannungsdifferenz verursachten Verluste im Hochsetz-Tiefsetz-Steller. Bei sehr hohen

mittleren SOC sinken zwar die Ohmschen Verluste, es fehlt aber u.U. Platz zum Einspeichern der rekuperierbaren Bremsenenergie.

Abbildung 89 zeigt die Abhängigkeit der Verbrauchssumme vom Mittelwert der Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Motor-Generator-Satz und mittlerem SOC des EDLC. Die verbrauchsgünstigsten Lösungen liegen in der Mitte der Fläche, die von der mittleren Spannungsdifferenz und dem mittleren SOC (hier in absoluter Höhe) aufgespannt wird.

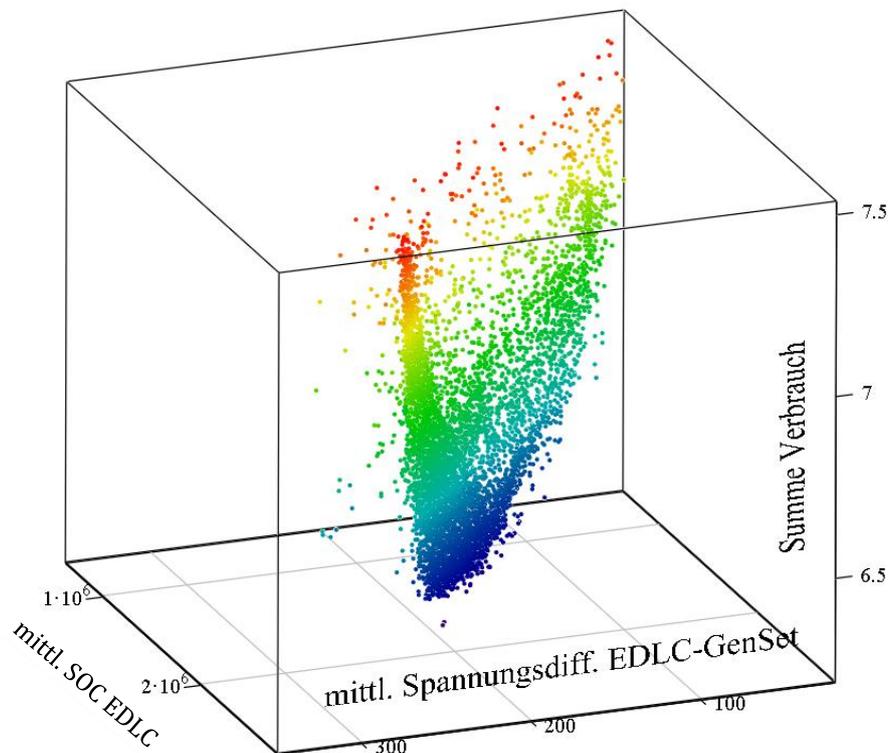


Abbildung 89 Darstellung der Verbrauchssumme in Abhängigkeit von mittlerem absolutem Energieinhalt SOC und der mittleren Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Motor-Generator-Satzes

In der Projektion der Varianten auf die x-y-Ebene wird eine Konzentration der Punkte auf die Diagonale sichtbar. Dies ist insofern erklärlich, dass die mittlere Spannungsdifferenz von EDLC zum Motor-Generator-Satz vom SOC abhängt.

12.2.6 STREUUNG DER EINFLUSSPARAMETER FÜR DIE BESTEN LÖSUNGEN

Um einen besseren Einblick zur Variabilität zu erzielen, wurden die Einflussgrößen und die erzielte Verbrauchssumme für die besten zehn Lösungen der Optimierung für die Summe für alle Fahrten in Abbildung 90 dargestellt.

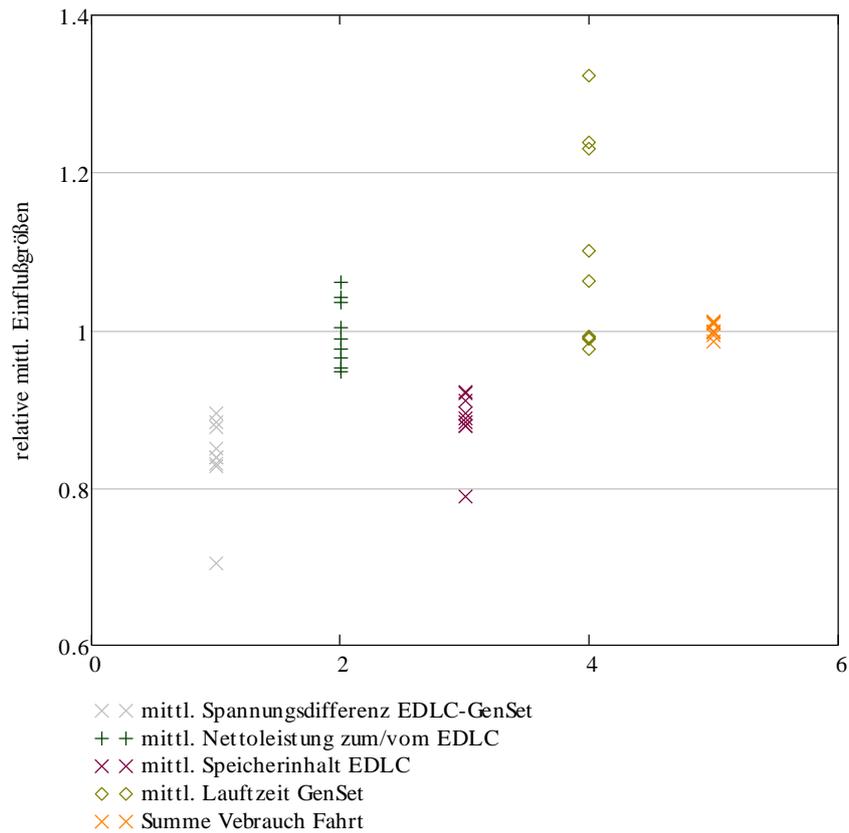


Abbildung 90 Vergleich der mittleren Einflussparameter für die zehn besten Lösungen

Beim Faktor für die Berücksichtigung der mittleren Nettoleistung vom/zum EDLC ist die Verteilung gleichförmig und der Faktor am zweithöchsten, beim mittleren Speicherinhalt und bei den mittleren Spannungsdifferenzen zwischen EDLC- und Motor Generator-Satz gibt es jeweils einen Ausreißer nach unten, bei der mittlerer Laufzeit, die auch seltener in den Lösungen vorkommt sind stark unterschiedliche und relativ hohe Lösungen vorhanden. Hier zeigt sich der Vorteil der Monte Carlo Simulation, dass viele unterschiedliche, aber dem Optimum nahe kommende Lösungen gefunden werden. Es sollte jedoch diejenige Lösung für eine Regelung übernommen werden, die für verschiedene Fahrkurven stabil niedrige Lösungen generiert.

Bei der Korrelation der mittleren SOC-Vorgaben im Betrieb mit dem Verbrauch in Tabelle 31 wurde zwischen den Varianten der Beeinflussung der einzelnen SOC-Grenzen unterschieden:

Tabelle 31: Vergleich der Pearsonsche Korrelationskoeffizienten für Zustandsgrößen mit der Verbrauchssumme für unterschiedliche Einfluss-Varianten

Einfluss/Korrelation mit	mittl. max. SOC Grenze	mittl. mittl. SOC Grenze	mittl. min. SOC Grenze	Anzahl Starts
nur Zustandsfaktoren kein Abstandseinfluss	-0,265	0,177	0,157	0,857
nur Abstandsfaktoren kein Einfluss Zustandsfaktoren	0,075	0,014	0,051	0,345
beide Einflüsse	-0,246	0,213	0,171	0,517

Tabelle 31 zeigt, dass bei der Nutzung von Zustandsfaktoren für die Beeinflussung der SOC-Grenzen der Hystereseregulierung die Korrelation der Verbrauchssumme mit den mittleren maximalen SOC-Grenzen (Schaltgrenzen für den Motor-Generator-Satz) im Betrieb am höchsten ist, gefolgt von der Korrelation mit den mittleren mittleren SOC-Grenzen. Bei Nutzung beider Einflüsse ist die zweite Korrelation noch etwas ausgeprägter. Es werden aber in Tabelle 31 für die Korrelation keine Werte erreicht, die es erlauben würden daraus sichere Schlüsse zu ziehen. Anders ist dies bei der Korrelation der Zahl der Starts des Motor-Generator-Satzes mit der Verbrauchssumme, wo besonders bei reiner Nutzung von Zustandsfaktoren ein hoher Korrelationskoeffizient zur Verbrauchssumme existiert. Dieser kann gut mit der erforderlichen Zusatzenergie für die Startvorgänge des Motor-Generator-Satzes erklärt werden.

12.3 VARIATION DES ENERGIEINHALTES DES EDLC

Die Verkleinerung des Energiespeichers zur Kostenminimierung hat dort eine Grenze, wo die Verzögerungsenergie nicht mehr rekuperiert werden kann. Die MC-Variation der Einflussfaktoren für das taktische Energiemanagement ermöglicht Lösungen, die mit kleinstmöglichem Speicher die gestellte Aufgabe erfüllen können. Im folgenden Kapitel wird eine Veränderung des maximalen Energieinhaltes des verwendeten Energiespeichers untersucht.

12.3.1 GRUNDLAGEN

Die Kosten für den EDLC sind mit derzeit (2014) ca. 15.000 USD / kWh (Abbildung 91 linkes Bild) auf Modulebene erheblich und eine Minimierung der Größe des EDLC daher wünschenswert. Die Preise chinesischer Einzelzellen sinken, wie in Abbildung 91 rechtes Bild gezeigt, bei Zellen mit höherer Kapazität auf 4.000 USD / kWh. Im Vergleich zu amerikanischen Zellen wird in derselben Abbildung sichtbar, dass hier bei zunehmender Zellengröße eine deutliche Kostensenkung zu erwarten ist. Im Vergleich mit Abbildung 91 links, kann aber vermutet werden, dass die Modulpreise nicht im selben Umfang sinken werden, da u.a. die Leistungselektronik hinzuzurechnen ist.

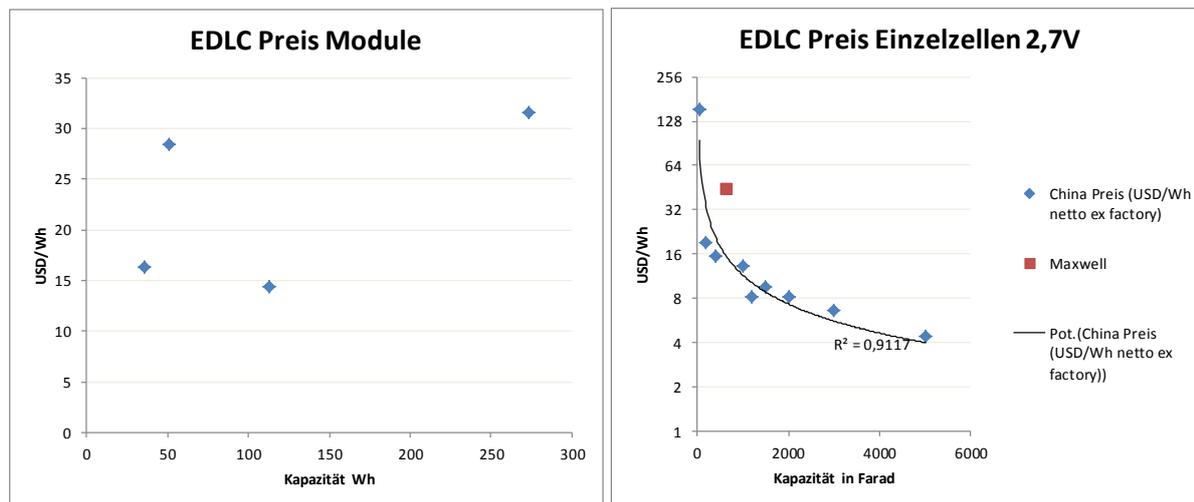


Abbildung 91 Preise für EDLC-Zellen und Module¹⁰

12.3.2 UMSETZUNG ERWEITERTE MONTE CARLO SIMULATION

Für die Variation des Energieinhaltes des EDLC bot sich an die Monte Carlo Variation um einen zusätzlichen Parameter zu erweitern. Durch die Variation der Zahl der EDLC-Zellen verändern

¹⁰ Quelle: www.tecategroup.com für Module und Dongguan Gonghe Electronic Co. Ltd., Taizhou Ambund Industry Co. Ltd. Sowie Shanghai Green Tech Co., Ltd. für Zellen abgerufen via Alibaba.com am 5.3.2014

sich jedoch auch die Masse des Fahrzeuges und damit auch der Fahrwiderstand (genauer der Beschleunigungswiderstand). Damit wird in der Simulation eine $n * m$ Matrix aufgespannt, wobei n für die Zahl der Varianten mit unterschiedlichen Faktoren für die Modulation der SOC-Grenzen steht und m für die Zahl der EDLC-Größen. Größere Matrizen haben jedoch nicht mehr im Programmspeicher von *Mathcad* Platz. Daher wurde die Zahl der variierten EDLC-Größen m und damit Anzahl der Berechnungen von Fahrten stark dezimiert, die Methode der überlagerten Variation und die hohe Zahl von Parametervarianten n für die Modulation der Grenzen der Hystereseregulierung jedoch beibehalten.

12.3.3 ERGEBNISSE ERWEITERTE MONTE CARLO SIMULATION

Die Simulation wurde für maximal 75.000 Varianten, aber aus Speichergründen nur für 100 EDLC Varianten, also in Summe 7,5 Millionen Varianten gerechnet. Damit können weniger gut besetzte Bereiche im Lösungsraum erwartet werden, wie ein beispielhaftes Ergebnis der zweidimensionalen MC-Variation in Abbildung 92 zeigt.

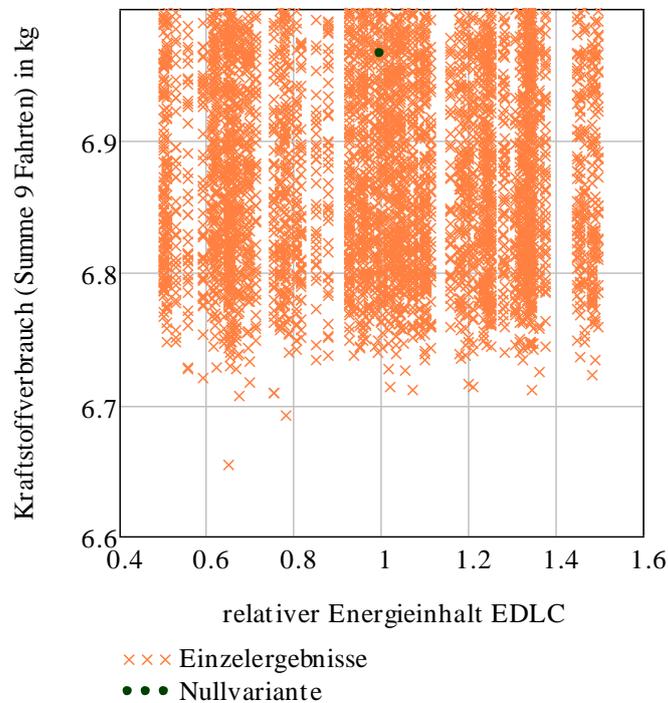


Abbildung 92 Verteilung der Ergebnisse für die Verbrauchssummen bei unterschiedlichen Energieinhalten der EDLC als Ergebnis der erweiterten Monte Carlo Variation 75.000 MC Varianten für je 100 EDLC Größen

Bei einer Betrachtung der Summe der Verbräuche, dargestellt über die EDLC-Größe, fällt auch ein Ausreißer nach unten bei etwas über 60 % der EDLC-Größe auf. Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgt für die Klassen der EDLC-Größen in Abbildung 93.

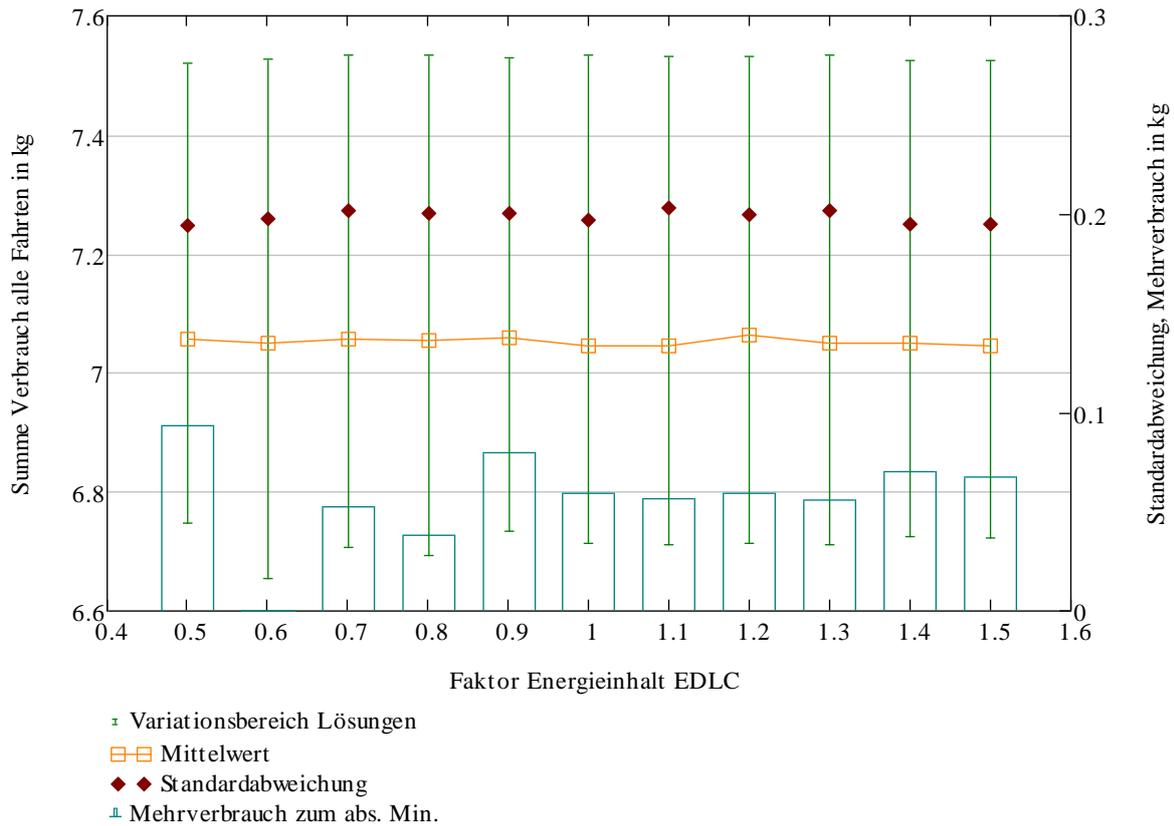


Abbildung 93 Ergebnisstatistik bei der Variation des Energieinhaltes des EDLC, 75.000 MC Varianten für je 100 EDLC Größen, variable Busmasse

Der Mittelwert des Verbrauchs für alle Variationen hat um 1 bis 1,1 (100 % bis 110 % der bisher in den Berechnungen verwendeten EDLC-Größe) ein Minimum. Das absolute Verbrauchsminimum fällt jedoch in die Klasse 0,6. Die Standardabweichung der Verbrauchssummen ist an den Rändern am niedrigsten.

Weiters wurde untersucht, ob ein Einfluss des Typs der Modulation der Schaltgrenzen besteht. Es wurden die auf einer zufälligen Parameterwahl basierenden Simulationsergebnisse den zwei Varianten bzw. der Variantenkombination des taktischen Energiemanagements zugewiesen. Ein Vergleich der Varianten mit und ohne Berücksichtigung des Abstandes bei der Modulation der SOC-Grenzen für die Hystereseregulierung zeigt Abbildung 94.

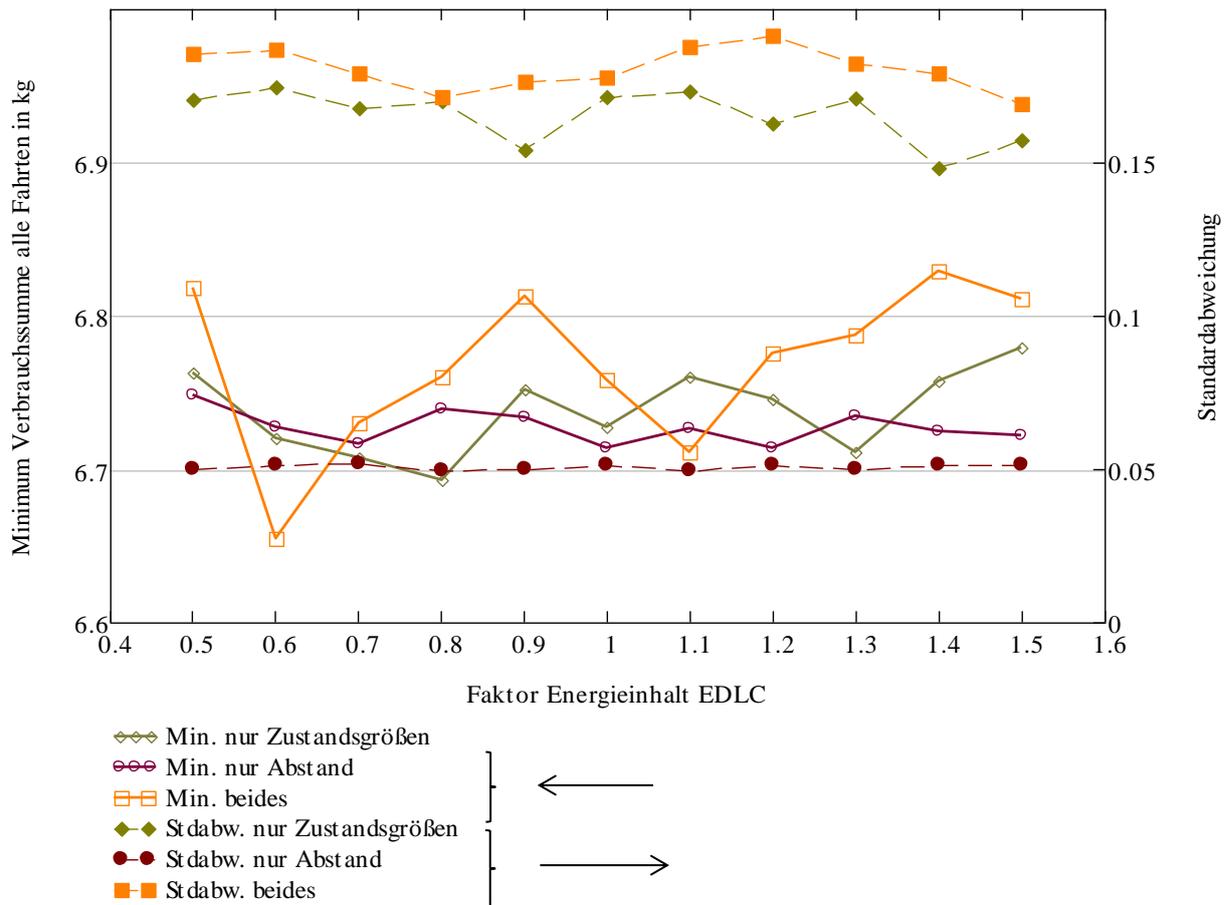


Abbildung 94 Vergleich der Varianten des taktischen Energiemanagements für verschiedene EDLC Energieinhalte (unterschiedliche Zahl von Lösungen)

Abbildung 94 zeigt, dass die Varianten mit Berücksichtigung der Zustandsfaktoren das absolute Minimum bei einem Einflussfaktor für den Energieinhalt von 0,6 hervorbringt, aber in den anderen Klassen größere Verbräuche bewirkt als die Varianten mit Berücksichtigung des Abstandseinflusses. Bei größeren EDLC-Speicherinhalten ist meist die Berücksichtigung nur der Abstände bei der Modulation der Schaltgrenzen zielführend, bei einem Einflussfaktor für den EDLC Energieinhalt von 1,4 liegt die Variante mit Berücksichtigung der Zustandsgrößen beinahe gleichauf. Die Berücksichtigung nur des Abstandseinflusses bei der SOC-Modulation führt zu geringeren Standardabweichungen in der Verbrauchssumme über alle Fahrten, die hohe Zahl der Lösungen erforderte aber aus programmtechnischen Gründen eine Eingrenzung, die dies verstärkt.

Unter praktischen Aspekten wird bei variablen Fahrkurven eine Nutzung des Abstandes bei der SOC-Modulation bei mittleren und höheren Speichergrößen geringere Verbräuche ermöglichen. Bei geringer Varianz der Fahrkurven wird die Berücksichtigung der Zustandsgrößen bei der Modulation der SOC Grenzen zum kleinsten Energieinhalt des EDLC beim Verbrauchsminimum führen. Es muss berücksichtigt werden, dass selbst eine Schwankung in der Auslastung des Busses die optimale Lösung verschiebt. Eine Verringerung der EDLC-Größe wird den mit niedrigem Verbrauch abdeckbaren Bereich an Routen einschränken.

12.4 AUSWIRKUNG DER VERBRAUCHSOPTIMIERUNG AUF DIE EMISSIONEN

Für die Optimierung in der MC-Simulation wurde der Verbrauch als Zielgröße definiert. Grund war u.a. dass die Höhe der NO_x und PM-Emissionen in Zukunft eher durch die nachgeschaltete Abgasreinigung (selektive katalytische Reduktion und Partikelfilter) bestimmt wird und die CO-

Emission durch motor-interne Maßnahmen beeinflusst werden kann. Es ist aber dennoch wichtig zu wissen, ob die Verbrauchsoptimierung einen Einfluss auf die Schadstoff-Rohemissionen vor der Abgasreinigung hat. Deswegen wurden die Emissionen des Motor-Generator-Satzes auch parallel zu den Verbräuchen in der MC-Variation für zufällig ermittelte Einflussfaktoren berechnet. Abbildung 95 zeigt, inwieweit die Emissionen, die nach dem ARTEMIS Model der TU-Graz mit Dynamikkorrektur nach Formel 21 berechnet wurden, mit dem Kraftstoffbedarf korrelieren. Dabei wurden die einzelnen Fahrten mit unterschiedlichen Symbolen gekennzeichnet, um Extreme erkennen zu können.

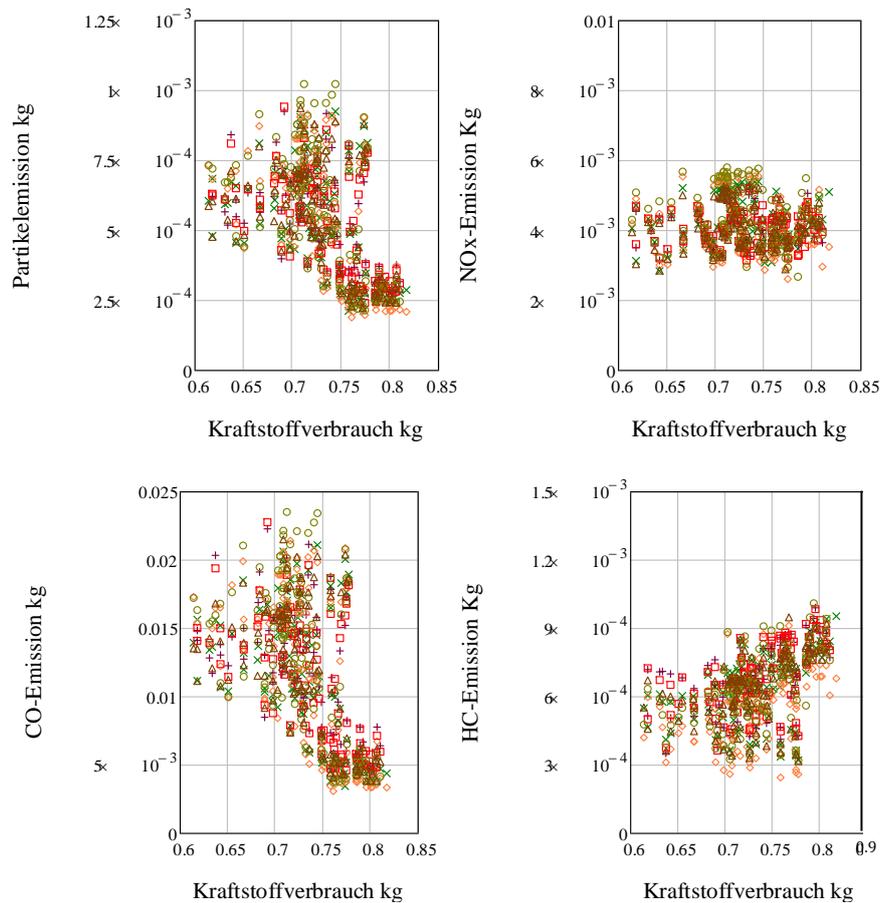


Abbildung 95: Korrelationen des Kraftstoffverbrauches mit den-Rohemissionen bei den Fahrten (Berechnungsergebnisse MC-Simulation)

Bei den Stickoxiden ist in Abbildung 95 rechts oben keine statistische Abhängigkeit der summierten Emissionen vom Summenverbrauch für die Fahrt zu sehen. Bei den Kohlenwasserstoffen kann anhand der in Abbildung 95 rechts unten gezeigten Korrelation eine leichte Senkung durch das optimale taktische Energiemanagement postuliert werden. Bei den Kohlenmonoxid und Feinstaub-Emissionen ist im Bereich der höheren Verbräuche, eine hohe Konstanz mit niedrigen Emissionswerten sichtbar, allerdings auch ein sehr signifikanter Anstieg hin bis zu den mittleren Verbräuchen. Dabei nimmt gleichzeitig jedoch die Streuung zu, die erst wieder bei den geringen Verbräuchen abnimmt. Es kann jedoch geschlussfolgert werden, dass die CO- und PM-Emissionen bei optimaler Kraftstoffeffizienz zumindest doppelt so hoch wie die erzielbaren Minima sind.

Es wäre, bei einer besonders hohen Luftbelastung durch z. B. Feinstaub, auch möglich den Faktorensatz für die Einflussgrößen zur Modulation der Schaltgrenzen auf eine solche Faktorenkombinationen umzuschalten, die zu geringeren PM-Rohemissionen bei erhöhtem

Verbrauch führen. Ein hochwirksamer nachgeschalteter Partikelfilter wiederum, verkleinert den absoluten Effekt dieser Maßnahme auf die Luftqualität jedoch stark.

Da der Betrieb der verkleinerten VKM mit hoher Last erfolgt, und bei hohem Abgas-Gegendruck infolge der Beladung des Partikelfilters die Last und damit die Abgastemperatur noch weiter erhöht werden kann, sind gute Voraussetzungen für die Regeneration des Partikelfilters vorhanden. Ein kleiner Energieinhalt des EDLC erlaubt jedoch keinen längeren Volllastbetrieb zur passiven Regeneration, die Gestaltungsfreiheit bei der Wahl der Last ermöglicht dem Motormanagement jedoch durch Verschiebung des Einspritzpunktes, Nacheinspritzung, Schließen des AGR-Ventils und einem Bypass um den Ladeluftkühler die Abgastemperatur für die Regeneration des Filters zu erhöhen. Daneben kann während des Stillstandes der VKM im Betrieb auch eine aktive Energie zuführende Regeneration z. B. auf der Basis einer Mikrowellenheizung erfolgen, wobei für eine gute Abreinigung auf eine ausreichende Sauerstoffversorgung zu achten ist (216).

12.5 ÜBERTRAGUNG DER ERGEBNISSE IN DIE PRAXIS

Im Folgenden werden die Möglichkeiten besprochen wie die Modulation der Schaltgrenzen der Hystereseregulierung in der Praxis realisiert werden kann.

12.5.1 VORGEHENSMODELL FÜR DIE UMSETZUNG IN DER PRAXIS

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es möglich ist mittels MC-Variation Einflussfaktoren für die heuristische SOC-Modulation zu finden, um für die Gesamtzahl der Fahrten den Verbrauch zu senken. Besonders bei den abstandsabhängigen Einflussfaktoren können die optimalen Einflussfaktoren für eine Teilmenge an Fahrten nutzbringend auf die Gesamtmenge übertragen werden. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass zur Erzielung der optimalen Lösung für jeden von der Verkehrssituation abhängigen Fahrttyp ein spezifischer Faktorensatz existiert. Durch die Vergrößerung der Datenbasis (Zahl der Fahrten) für die Bestimmung der optimalen Einflussfaktoren kann die Robustheit der besten Lösung verbessert werden, d. h. die Lösung mit einer bestimmten Faktorenkombination wird weniger sensibel gegenüber untypischen Fahrkurven. Einzelergebnisse für bestimmte Fahrten können dabei auch über dem für diese Fahrt absolutem Optimum liegen. Es ist aber mit vertretbarem Aufwand nicht möglich die Parameterbestimmung in Echtzeit mittels MC-Variation in das Fahrzeug zu legen. Sehr wohl ist es aber möglich die Parameter mit unterschiedlichen Datensätzen zu bestimmen und nach Erkennung eines bestimmten Fahrttypus umzuschalten. Abb. 91 zeigt einen möglichen Ansatz für die Umsetzung in der Praxis, bei dem die Einflussfaktoren anhand von aufgezeichneten Fahrten für jeden Fahrttypus mittel Monte Carlo Variation getrennt erstellt und in das Fahrzeug übertragen und dann im Betrieb ausgewählt werden:

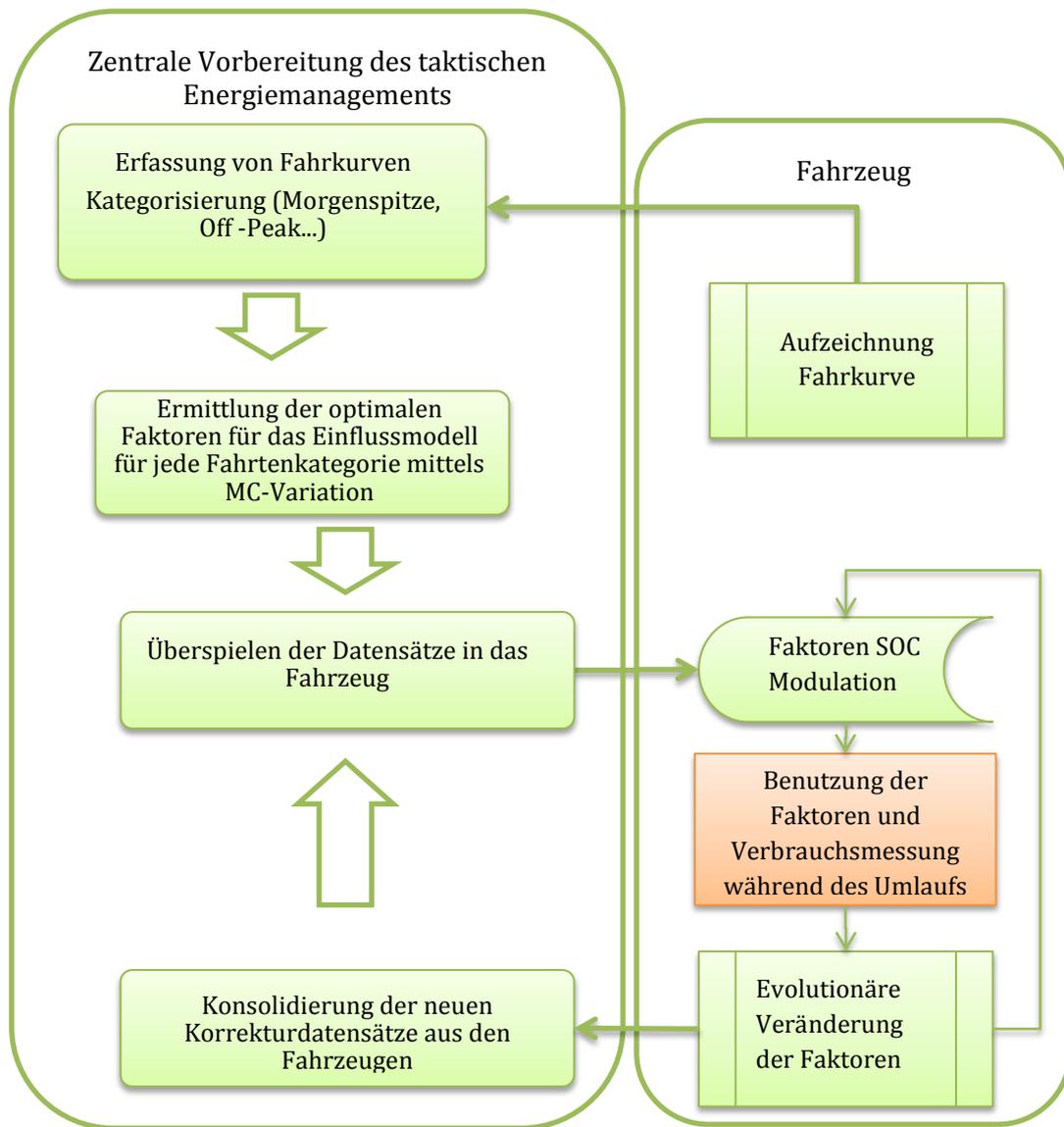


Abbildung 96: Umsetzungsvorschlag des Telematik-basierten taktischen Energiemanagements in der Praxis

Über eine Rückführung der Fahrkurven, sowie eine Kalibrierung des Modells können neue Datensätze mit den Faktoren für das Einflussmodell berechnet werden. Eine zusätzlich eingeführte evolutionäre Veränderung der Einflussfaktoren im Fahrzeug (über Fuzzy-Control etc.) kann individuelle Anpassungen für das Fahrzeug auch abhängig vom Besetzungsgrad vornehmen. Über eine Einkopplung von Verbrauchsmessungen als Maß für die Güte der Lösungen könnten auch genetische Algorithmen genutzt werden. Bei der Mutation werden Eigenschaften der selektierten Lösungen zufällig verändert. Diese Einflussfaktoren für die unterschiedlichen Fahrzyklen können wieder benutzt werden um alle Fahrzeuge damit zu versorgen. Parallel kann mit den Aufzeichnungen von Fahrkurven und Verbrauch auch das Simulationsmodell für die MC-Variation kalibriert werden um eine neue optimale Faktorenkombination vorberechnen zu können. Damit ist es möglich bereits mit einer verbrauchsgünstigen Faktorenkombination zu starten und es muss nicht auf den Fortschritt der evolutionären Verfahren gewartet werden.

Es ist für die Umsetzung des taktischen Energiemanagements zwar keine kostenintensive Hardware im Fahrzeug nötig, aber je nach Variante kundenseitig Schnittstellen zum unternehmenseigenen GIS oder ITCS zu schaffen, um die Fahrzeugrechner mit den Positionen

der potentiellen Zwangshalte zu versorgen. Diese Kosten sind aber den erzielbaren Kraftstoffeinsparungen gegenüber zu stellen. Nachdem die Datenschnittstellen generisch sind und für alle Linien nutzbar sind, können Skaleneffekte erwartet werden. Bei neuen ITCS- oder Telemetrie-Installationen (letzteres zur Ferndiagnose siehe (217)) benötigt es zwar noch ein verbundenes GIS, aber die laufenden Kosten für die Datenübertragung sowie die Plausibilitätsprüfung sind gering (siehe Abbildung 99). Auch bei nicht vom Abstand abhängigen Verfahren zur Modulation der Schaltgrenzen bringt eine zentrale Konsolidierung der im Fahrzeug optimierten Einflussfaktoren und das ebenso sinnvolle Kraftstoffmanagementsystem zentrale Mehrkosten. Es entfallen aber die Aufwände für die Gewinnung und Verarbeitung von potentiellen Zwangshalten.

12.5.2 SYSTEMARCHITEKTUR DATENGEWINNUNG UND –VERTEILUNG FÜR VOM ABSTAND ABHÄNGIGE VERFAHREN

Im Folgenden werden Überlegungen zur Systemarchitektur für die Umsetzung eines taktischen Energiemanagement-Systems mit Nutzung von Abständen zu potentiellen Zwangshalten für die Modulation der Schaltgrenzen angestellt. Als Alternative zum vorgeschlagenen Weg der Gewinnung der Daten für potentielle Zwangshalte aus einem GIS und mit manueller Unterstützung und Kenntnis der Route, kann auch ein selbstlernendes System genutzt werden. Diese nutzt logische Informationen wie Stillstände und Türbetätigung für die Identifikation von Zwangshalten. Tabelle 32 stellt die Varianten gegenüber:

Tabelle 32: Gegenüberstellung Selbstlernendes System – Datenversorgung aus dem GIS

Charakterisierung der Verfahren:

	Datenversorgung aus dem GIS	Selbstlernend mit ITCS-Schnittstelle	Selbstlernend autark
Datengewinnung Zwangshalte	statistisch über GPS	eigenes GPS	eigenes GPS
Schnittstellen zum Fahrzeug	Position aus ITCS, optional Türsteuerung	keine wenn GPS integriert	keine
Schnittstellen zu externen Datenquellen	ITCS, ggf. V2I (Kreuzungsrechner), V2C-Communication	ITCS, ggf. V2I (Kreuzungsrechner), V2C-Communication	

Bewertung der Verfahren:

	Datenversorgung aus dem GIS	Selbstlernend mit ITCS-Schnittstelle	Selbstlernend autark
Einsetzbarkeit	bei konstantem Linienbetrieb einfach möglich	flexibel aber ggf. Tabula Rasa (alle Angaben auf Standardwerten) am Beginn des Kurses	sehr flexibel aber ggf. Tabula rasa am Beginn des Kurses
Güte der Regelung	von Beginn weg gut, besonders mit Schnittstellen zu externen Datenquellen	nimmt zu, bei Fahrzeug-übergreifendem Datenaustausch gut	nur bei schnellem Umlauf und fixer Fahrzeugzuordnung ausreichende Lernkurve

Selbstlernende Verfahren sind möglich, wenn die logische Erkennung von Zwangshalten zuverlässig arbeiten kann, und die Ortungsqualität beim fahrzeuggebundenen GPS ausreichend ist. Beim Ersatz von Fahrzeugen müssen die Daten aber sofort dem neuen Fahrzeuge zur Verfügung stehen. Die **Datenhaltung auf einem zentralen Server** ist also eine Notwendigkeit.

Eine ausschließliche Nutzung des GIS zur Datengewinnung wiederum, würde nur eine Basis schaffen, ohne die aktuellen Positionen von Zwangshalten zu kennen. Mittels Aufzeichnung von GPS Daten wäre es möglich, statt der Abstände zu potentiellen Zwangshalten, die Zeit bis zum Eintreten des Energieumsatzes zu berücksichtigen und den erwarteten Energieumsatz für die Charakteristik der aktuellen Fahrt zu korrigieren. Eine autarke Systemarchitektur zur Gewinnung und Verteilung der Daten für das strategische Energiemanagement könnte damit wie in Abbildung 97 gezeigt aussehen:

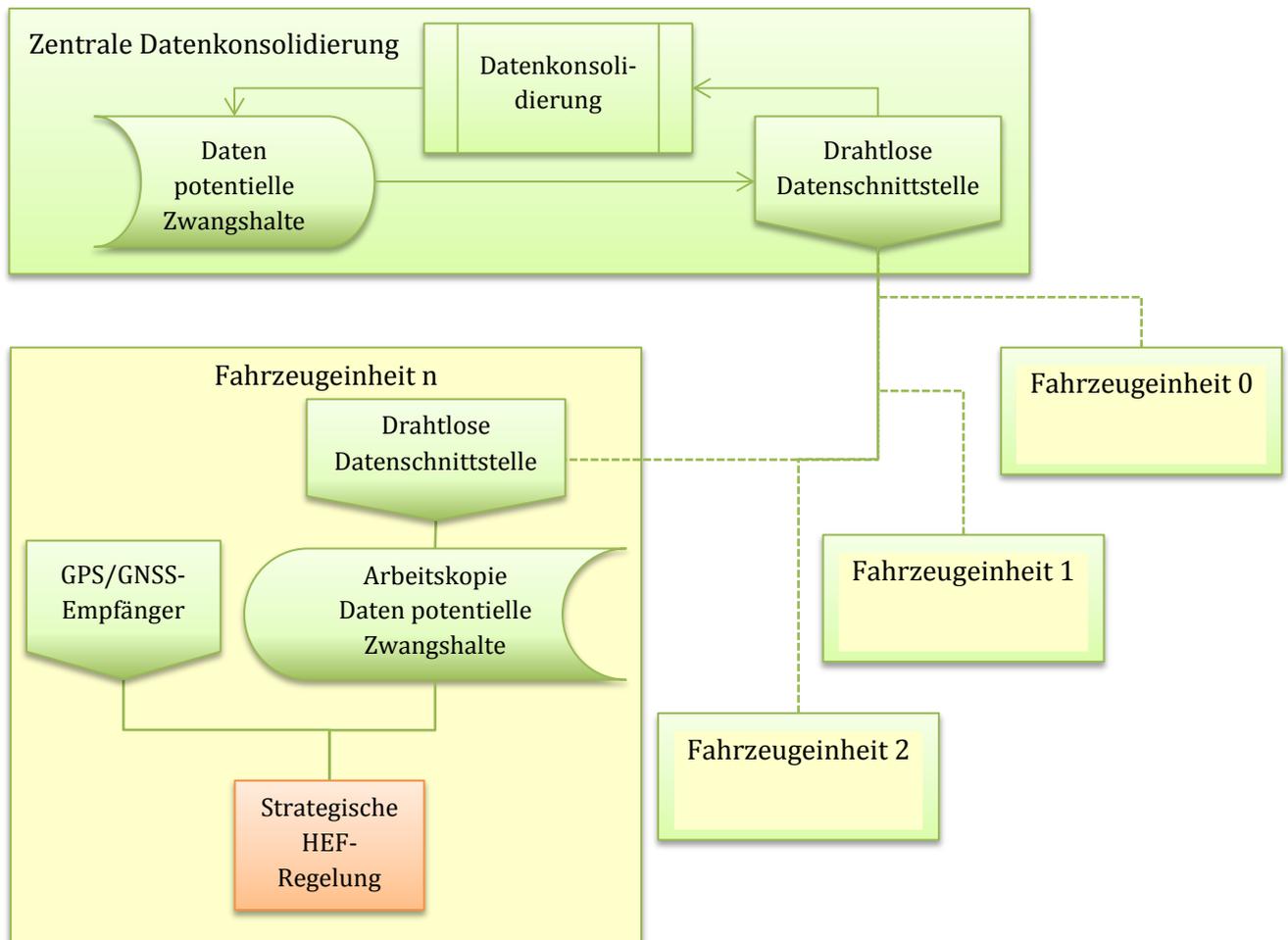


Abbildung 97 autarke umsetzbare Systemarchitektur mit zentraler Datenhaltung

Die Fahrzeugeinheiten übertragen entsprechend Abbildung 97 zumindest Halte an die Zentrale, wo mittels Statistikfunktionen die Wahrscheinlichkeit für einen häufigen Zwangshalt ermittelt wird. Dabei ist es auch möglich einen Algorithmus mit einer Art gleitendem Mittelwert für die Gewichte zu verwenden, wie in Formel 30 beschrieben, um aktuelle zeitlich veränderliche Verkehrsbehinderungen zu berücksichtigen. Dazu können in der Praxis noch zeitliche Abstände zu den potentiellen Zwangshalten und Energieumsätze in den Segmenten zwischen den Zwangshalten erfasst werden.

Tabelle 33: Algorithmus zur Gewichtung potentieller Zwangshalte

Bei Meldung eines potentiellen Zwangshaltes (Verzögerung und Unterschreitung Mindestgeschwindigkeit) durch ein Fahrzeug:	Bestimme die Dämpfungskonstante (Abwertung der ältesten Meldungen) aus dem geplanten Intervall der Fahrzeuge, mit dem sie die Stelle erreichen
	Wenn die Position weiter als 10 m von einem bekannten Zwangshalt entfernt ist: Anlegen eines neuen Zwangshaltes mit dem Alter Null
	Ansonsten Zuordnung des Events zu einem bekannten Zwangshalt
Für alle gespeicherten Zwangshalte	Ermittle das aktuelle Alter des potentiellen Zwangshaltes
	Berechnung des Wichtungsfaktors (aus Dämpfungskonstante und dem Alter der Meldung), sodass der Wichtungsfaktor abnimmt, falls der Zwangshalt nicht innerhalb des Intervalls wieder gemeldet wird

Aufgrund der generischen Eigenschaften einer selbstlernenden Architektur zur Ermittlung von Orten mit starker Verzögerung, kann diese auch bei elektrischen Antrieben in Fahrzeugen in einem Linien- oder linienähnlichen Betrieb eingesetzt werden, wo eine Ladung an bestimmten Fixpunkten wie Haltestellen oder Haltepositionen stattfindet, oder auch bei Elektrofahrzeugen im Linienbetrieb allgemein. Allerdings ist bei vorgegebenen Fahrzeiten eine Energie-sparende Veränderung der Geschwindigkeitsrampen und Höchstgeschwindigkeiten im Fahrbetrieb nur dann möglich, wenn es die Lage im Fahrplan erlaubt. Darüber hinaus ist das Inkludieren eines GPS in Benutzerschnittstellen von routenunabhängig operierenden Elektrofahrzeugen sinnvoll, weil damit auch Informationen über die tatsächliche Erreichbarkeit von Orten und mögliche Ladepunkte bereitgestellt werden können.

Die für den Betrieb liniengebundener Fahrzeuge vorgestellte Systemarchitektur umfasst Datenübertragung vom und in das Fahrzeug. Abbildung 98 zeigt den Aktualisierungszyklus für die Daten.

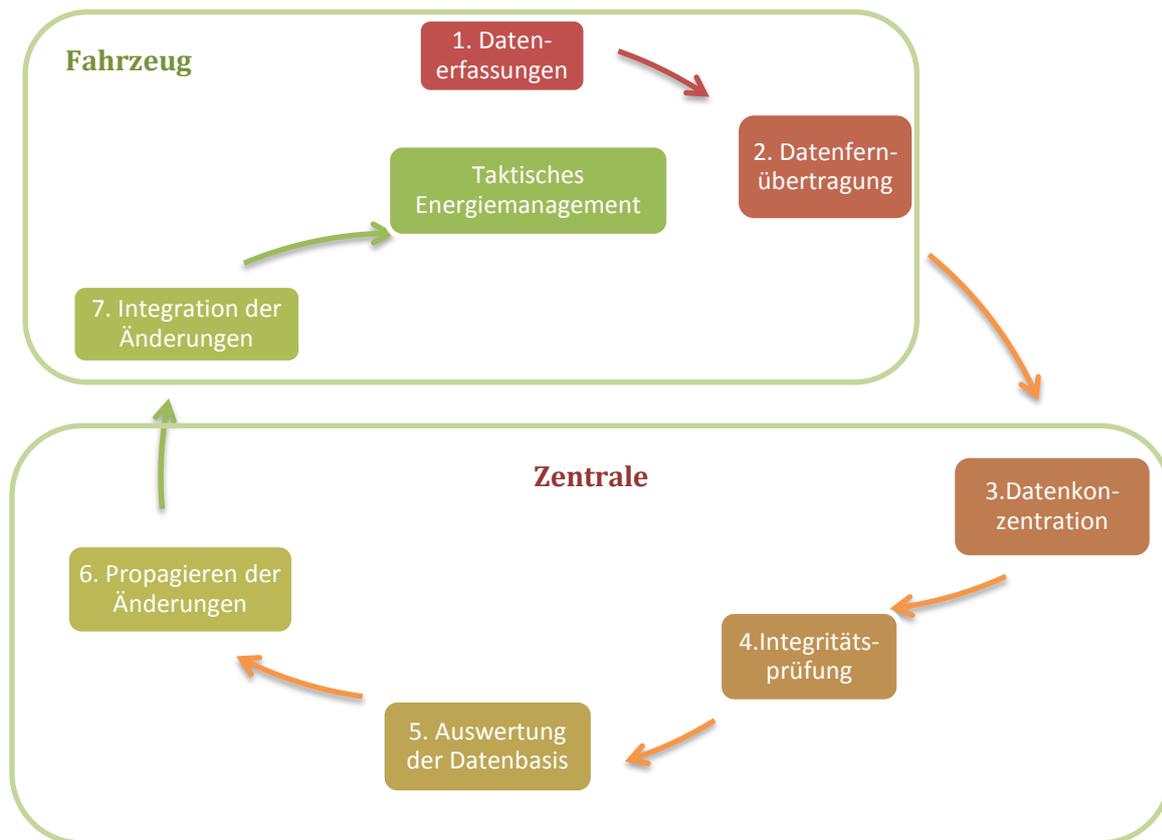


Abbildung 98 Ablauf Datengewinnung und Datenversorgung Fahrzeuge

Die von Fahrzeugflotten *upstream*, d. h. zum Server (3.), übertragene Datenmenge nimmt dabei mit der Anzahl der Fahrzeuge zu. *Downstream*, d. h. bei der Verteilung der Daten an die Fahrzeuge, kann über das IP Multicasting (217) die Bandbreite besser ausgenutzt werden, da alle Fahrzeuge einer Linie dieselben Daten-Updates erhalten.

12.5.3 VERIFIZIERUNG DER SYSTEMARCHITEKTUR

Im CONVERGE-Projekt (218) wurden eine Verifizierung und Validierung einer Systemarchitektur entwickelt. Bei der Verifikation der funktionalen Systemarchitektur wird überprüft, ob die Anforderungen durch die Systemcharakteristik abgebildet werden, bei der Validierung wird überprüft ob die Nutzeranforderungen erfüllt werden. Dieses Verfahren wird hier vereinfacht angewandt. Als Nutzer wird hier in Tabelle 34 das taktische Energiemanagement im Fahrzeug gesehen:

Tabelle 34: Verifizierung funktionale Systemarchitektur

Anforderungen	Verifikation ggü. Inkonsistenzen	Validierte Funktionalität ggü. Nutzeranforderung
Nutzbare Daten im Fahrzeug vorhanden	Es muss sichergestellt sein, dass ein Datenzugriff möglich ist, auch wenn gerade ein Datenupdate läuft.	Ohne Datenzugriff werden gespeicherte Faktoren für Einflussgrößen oder fixe SOC-Schaltgrenzen genutzt.
Halt mit Koordinaten und Attributen an die Zentrale kommuniziert	Daten sollten bei Unterbrechung der Übertragung nicht verloren gehen.	
Daten konsolidiert und mit Alter und Dämpfung gewichtet	Eine konsistente Datenbasis muss vorhanden sein.	
Daten an Fahrzeuge verteilt	Der Empfang der Daten muss parallel zum Betrieb des taktischen Energiemanagements erfolgen.	Parallele Prozesse für Regelung und Datenempfang ermöglichen die Erfüllung der Anforderung
Datenupdate im Fahrzeug	Es muss sichergestellt sein, dass eine gültige Datenbasis vorhanden ist. D. h. es ist eine Datensicherung und Wiederaufrollen des Datenupdates nötig, wenn eine Inkonsistenz auftritt.	Kein Update sowie Fall-back zur ursprünglichen Lösung, bei Erkennen von fehlerhaften neuen Daten

Bei der Verifizierung in Tabelle 34 wurden Eigenschaften abgeleitet die einen robusten Betrieb ermöglichen. Es ist dabei nötig, dass das System selbst erkennen kann, ob die Datenbasis gültig ist. Zur Sicherheit soll die physikalische Systemarchitektur eine Redundanz besitzen, sodass der Motor-Generator-Satz den Energiespeicher nicht überladen kann. Die Schutzschaltung für den Antrieb ist nicht Teil des taktischen Energiemanagements und wird getrennt implementiert. Bei Versagen der Datenbereitstellung für das taktische Energiemanagement oder bei einer korrupten Datenbasis läuft ein Notprogramm ab.

Darüber hinaus gibt es **nichtfunktionale Anforderungen**, die hier separat besprochen werden. Die Leistungsfähigkeit (Performanz) der Datenübertragung und -verarbeitung ist Teil der nichtfunktionalen Anforderungen. Für ein Netz mit 400 km Betriebsstreckenlänge und einem durchschnittlichen Abstand zwischen potentiellen Zwangshalten von 80 m¹¹ ergeben sich z. B. 5.000 Halte. Wenn diese nach jedem Fahrplanintervall von 10 Minuten zu einer Übertragung führen, ergeben sich ca. 8 Übertragungen pro Sekunde. Die Übertragungsgeschwindigkeit beim sofortigen Upload dieser Positionsdaten wird mit modernen Paket basierten drahtlosen Datenübertragungsverfahren keine Probleme bereiten, da die Datenmenge pro Bus gering ist, jedoch muss bei größeren Flotten der Server auch 100 Meldungen und mehr pro Sekunde verarbeiten können. Bei der Datenverteilung *downstream* also zu den Fahrzeugen, macht es wegen der Belastung des Servers Sinn, mit Delta-Updates (Übertragung der Datensätze die sich geändert haben siehe (219)) zu arbeiten und ggf. jede Linie separat über Multicasting anzusprechen, wenn viele Fahrzeuge pro Linie im Einsatz sind. Es ist aber sicherzustellen, dass im Betriebsbereich die zellulären drahtlosen Datenübertragungssysteme entsprechend leistungsfähig sind, wenn gleichzeitig Multimedia-Inhalte (z. B. On-Line Videoüberwachung) mit denselben Systemen übertragen werden oder Fahrgäste gleichzeitig über das System Videos streamen. Für den Speicherbedarf werden im Fahrzeug, selbst bei einem Daten-Backup für das Re-Rolling keine hohen Anforderungen entstehen, da pro Linie eine überschaubare Zahl von potentiellen Zwangshalten existiert. Wichtig ist es jedoch über einen

¹¹ Im berechneten Beispiel sind es auf der Grazer Innenstadstrecke der Linie 67 im Mittel 66 m zwischen den potentiellen Zwangshalten.

Konsolidierungsalgorithmus eine zu starke Vereinzelung der Positionen zu vermeiden die z. B. durch Variation der Stauenden und Stop'n Go Verkehr entsteht. Die vorzuhaltende oder freizuhaltende Energie kann vorteilhafterweise mit dem aktuellen Fahrzeuggesamtgewicht bereits im Fahrzeug berechnet werden, womit nicht die Geschwindigkeitskurven übertragen werden müssen. Diese Konsolidierung am Server kann über die besprochene Abwertung älterer Daten erfolgen, wobei ab einem bestimmten Alter der Wichtungsfaktor zu Null gesetzt werden kann.

Das System erlaubt, bei offener Definition der Schnittstellen, den Einsatz unterschiedlicher Fabrikate bei den Fahrzeugsystemen zur Datengewinnung. Bei, auf Standards basierten von der Steuerung abgetrennten Kommunikationseinheiten, können verschiedene physikalische Datenübertragungskonzepte benutzt werden. Es ist auch ohne weiteres möglich den Takt zu verändern und mehr oder weniger Fahrzeuge einzusetzen, ohne das System adaptieren zu müssen. Das vorgestellte System ist an allen Standorten mit entsprechend leistungsfähiger drahtloser Datenfernübertragung einsetzbar, die Adresse des zentralen Servers muss allerdings bei Überstellung von Fahrzeugen neu eingetragen werden, und es müssen idente Datenschnittstellen vorhanden sein. Eine Standardisierung der Formate der übertragenen Datensätze ermöglicht eine Austauschbarkeit von Komponenten und eine Interoperabilität.

12.5.4 KOSTEN-NUTZEN BETRACHTUNG

Bei definiertem Nutzen ist für die Senkung der Kosten für den On-Board-Telematikteil ein Skaleneffekt und eine weite Verbreitung des Systems von Nutzen. Konkurrierende Fahrzeughersteller können einen mit dem vom Verkehrsbetrieb separat beschafften zentralen Server kompatiblen Telematikteil einbauen und mit dem eigenen taktischen Energiemanagement-Modul koppeln. Bei einer angenommenen mittleren Einsparung von ca. 3 % Kraftstoff im Vergleich zur Nullvariante steht pro Fahrzeug und Jahr folgende Summe aus Tabelle 35 für die Annuität der zusätzlichen Investition in On Board Units, bestehend aus Telematikteil und Ansteuerung des Motor-Generator-Satzes, zur Verfügung:

Tabelle 35: Kostenansätze Wirtschaftlichkeitsberechnung (207)

Ausgangsniveau Kraftstoffkosten	37.420	€ / a
Kraftstoffkosten Hybridbus	29.940	€ / a
Kosten Zusatzstoffe	260	€ / a
Einsparung durch taktisches Energiemanagement	3 %	
maximale zulässige Annuität durch die Einsparung Kraft- und Zusatzstoffe durch das taktische Energiemanagement	906	€ / a
Behaltdauer Bus	14	a
über die Behaltdauer kumulierte Einsparung pro Fahrzeug (wirtschaftliches Investitionsbudget pro Fahrzeug ohne Zentrale)	12.684	€ / a
Kostensteigerung Kraftstoff und Zusatzstoffe	5	% p. a.
Abzinsung für den Kapitalwert (Nettobarwert)	3	% p. a.

Mit diesen Daten aus Tabelle 35 kann die Summe berechnet werden, die pro Bus abzüglich der zentralen Investition maximal in die On Board Unit investiert werden darf um die Einsparungen nicht zu kompensieren. Abbildung 99 zeigt, dass bei kleinen Flotten die Wirtschaftlichkeit in Frage gestellt ist. Allerdings ist es auch möglich die Entwicklungskosten der Software für die Zentrale auf die Verkehrsunternehmungen zu verteilen um Flotten unter 400 Fahrzeugen die Chance zu geben das System einsetzen zu können. Kleinere Flotten werden möglicherweise auch

geringere Kraftstoffeinsparungen realisieren können, wenn sie in Kleinstädten mit weniger potentiellen Zwangshalten angesiedelt sind.

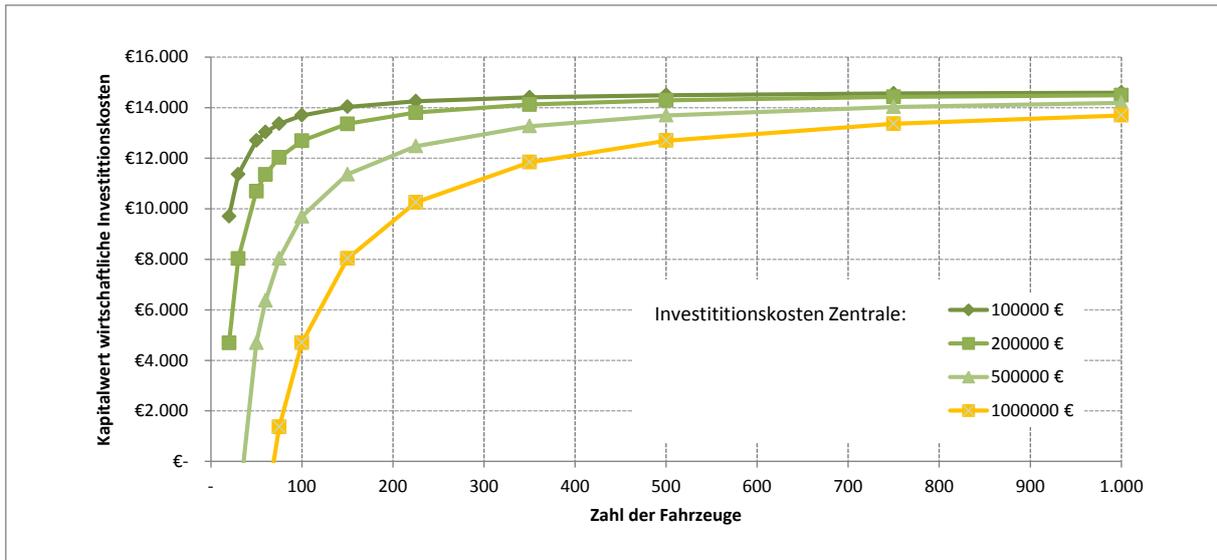


Abbildung 99: Kapital- oder Nettobarwert für die maximal zulässige Investitionskosten im Fahrzeug in Abhängigkeit von der Flottengröße und der Investitionshöhe für die zentrale Funktionalität

Eine Motivation der Eingliederung des zentralen Datenkonsolidierungsservers für das taktische Energiemanagement in das ITCS ist die Möglichkeit die im ITCS übertragene Datenmenge zu reduzieren, da stehende Fahrzeuge das erkennen und keine neue Position melden müssten.

13 ZUSAMMENFASSUNG

Für die Untersuchung des Telematik-unterstützten taktischen Energiemanagements von **seriell-hybriden Antrieben** mittels heuristischer Algorithmen wurde die Anwendung in einem städtischen Linienbus ausgewählt. Als Grundlage für die Simulation wurde eine **Hystereseregulung** des Stromerzeugers angenommen, die einen oberen und unteren Ladezustand des Kurzfrist-Energiespeichers als Schaltgrenzen benutzt. Die zu validierende Hypothese lautete, dass eine Berücksichtigung des **Abstandes zu potentiellen Zwangshalten** wie z. B. Lichtsignalanlagen, Haltestellen oder 90°-Kurven bei der Festlegung der Schaltgrenzen für die Hystereseregulung hilft, um den Kraftstoffbedarf und ggf. die Emissionen zu verringern. Neben einer **prädiktiven taktischen Regelung** wurde eine zweite Variante entwickelt, bei der **Zustandsgrößen** aus dem Betrieb des Motor-Generators-Satzes des Antriebes zur Modulation der Schaltgrenzen der Hystereseregulung verwendet werden.

Die quasistatische rückwärts blickende Simulation des Antriebs und des Betriebs des Fahrzeuges auf der Basis aufgezeichneter Fahrkurven wurde vollständig neu in *Mathcad* entwickelt. Es nutzt vorausberechnete, von Drehzahl- und Leistung abhängige, Verbräuche der Verbrennungskraftmaschinen und ebensolche Wirkungsgrade der Elektromotoren, sowie der Leistungselektronik. Das Modell berechnet im Simulationskern für jeden Zeitschritt die Verluste der Energiespeicher (bestehend aus Leckage und Innenwiderstand) und je einem Hochsetz-Tiefsetz-Steller zwischen Controller des Stromerzeugers und einem elektrochemischen Doppellagenkondensator EDLC zwischen EDLC und dem Controller der Antriebsmaschine. Die Implementierung des Modells erfolgte modular mit Schnittstellen zwischen den Daten für Antrieb und Stromerzeuger sowie der Regelung. Der **Wirkungsgrad** der elektrischen Maschine für Antrieb und Rekuperation konnte so für jede Fahrkurve **vorausberechnet** werden und die Simulation dann auf die Berechnung der elektrischen Energieströme zum/vom Energiespeicher zurückgeführt werden. Fälle mit Energiedefizit, die der Fahrkurve nicht folgen können, wurden ebenso ausgeschieden wie Fälle mit zu häufigen Starts des Stromerzeugers (aus psychoakustischen Gründen) oder zu großen Abweichungen im Energiespeicher zwischen Start und Ende der Simulation.

Als Besonderheit des seriell-hybriden Antriebes konnte die **Drehzahl** der fix mit dem Generator gekoppelten VKM in Abhängigkeit von der geforderten Leistung im Voraus bestimmt werden. Dazu wurden die Wirkungsgrade der beiden Maschinen für jede mögliche Kombination aus Leistung und Drehzahl ermittelt und für jede Leistung der optimale Betriebspunkt, also die **optimale Drehzahl**, definiert. Bei der Optimierung führten die Berücksichtigung des Wirkungsgrades und der zusätzlichen Masse eines Getriebes zur Favorisierung einer **getriebelosen Lösung** für den Motor-Generator-Satz. Die Spannungsunterschiede zwischen Generator und Energiespeicher (EDLC) erfordern nach der eingehenden Untersuchung nicht, dass die Betriebspunkte des Motor-Generator-Satzes in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis und der Last gewählt werden.

Die **Fahrkurven**, die im 1s Intervall mittels **GPS** aufgezeichnet worden waren, wurden in einem ersten Schritt auf ihre Eignung untersucht und ungeeignete Aufzeichnungen verworfen. Die benutzte und durch Kombination von Fahrtenteilen **erweiterte Stichprobe** hatte eine große Varianz in Bezug auf den streckenbezogenen Energieumsatz, womit eine Validierung der Hypothesen für das taktische Energiemanagement vereinfacht wurde.

Bei Simulation wurden bis zu 200.000 Varianten im Rahmen der **Monte-Carlo-Variation** für 9 Fahrkurven durchgerechnet. Es konnten Algorithmen gefunden werden, die den Gesamtverbrauch über alle neun Fahrten verringern, wenn die Einflussfaktoren vorher mit einer

Teilmenge an Fahrkurven ermittelt wurden. Die Ergebnisse sind insofern zufällig, als das auch bei geringeren Stichprobengrößen zufällige Faktorenkombinationen für den Einfluss von Zustandsfaktoren des Motor-Generator-Satzes gefunden werden, die eine Lösung nahe dem Optimum für die simulierten Fahrkurven hervorbringen. Abbildung 100 zeigt eine Statistik beispielhafter Ergebnisse für drei unterschiedliche **Varianten der Modulation der Schaltgrenzen der Hystereseregulung** über heuristische Algorithmen.

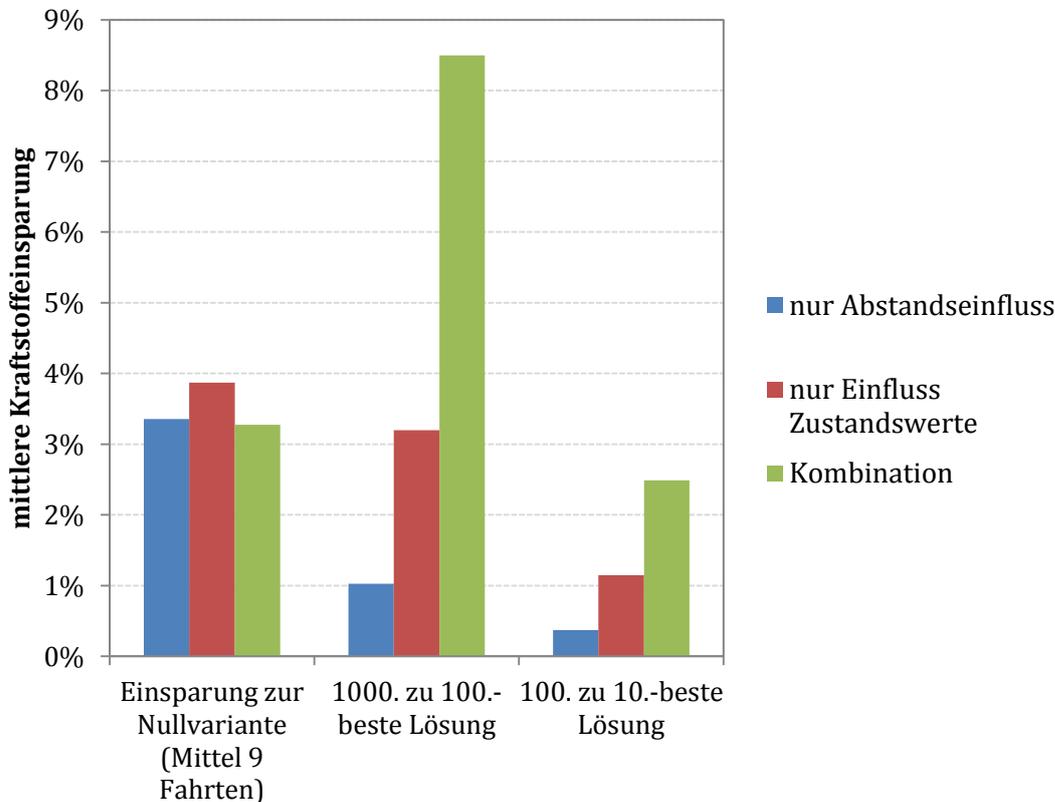


Abbildung 100: Mittelwerte der Verbrauchseinsparung bei der MC-Variation für verschiedene Kombinationen des Einflusses von Zustandsgrößen und Abstand zu potentiellen Zwangshalten bei der Modulation der Schaltgrenzen der Hystereseregulung für variable Busmasse

Bei der Bewertung der erzielten einstelligen Einsparungen ist zu beachten, dass diese ohne Veränderungen am Antriebsstrang, also nur durch die **in Software umgesetzte Regelungslogik** erzielt werden. Die **maximale Einsparung** der dem absoluten Optimum nahen Variante im Vergleich zur Nullvariante der Hysterese-Regelung mit konstanten Schaltgrenzen (Nullvariante) beträgt nach Abbildung 100 im Mittel etwas unter 4 % und wurde für die Variante mit ausschließlichem Einfluss der Zustandsfaktoren erzielt. Dies ist ca. doppelt so viel wie in einem Linien-ungebundenen Betrieb durch eine Optimierung erzielt wurde (205). Die nur vom Abstand zu den potentiellen Zwangshalten abhängigen Lösungen haben jedoch die geringsten Mehrverbräuche bis zur tausend-besten Lösung, während besonders bei der Kombination der Einflüsse von Zustandsfaktoren und Abständen auf die Schaltgrenzen die Zahl der möglichen Parametervariationen sehr schnell suboptimale Lösungen präsentiert. Eine reine **Abstandsabhängige Modulation der Schaltgrenzen für die Hysterese-Regelung** des Motor-Generator-Satzes bringt also nicht die absolut niedrigsten Verbräuche mit sich, zeigt jedoch auch bei Verstimmung der Parameter einen nur flachen Anstieg des Summenverbrauchs für alle Fahrten. Es kann durch diese Auswertungen postuliert werden, dass eine Modulation der Schaltgrenzen abhängig vom Abstand zu den potentiellen Zwangshalten eine robuste, wenig von optimalen Parametern abhängige, Lösung darstellt, die zu signifikanten Einsparungen beim Kraftstoff-

verbrauch führt. Getestet wurde die Hypothese durch die Benutzung von Einflussfaktoren aus einer Optimierung über eine *Monte-Carlo*-Simulation auf der Basis einer Teilmenge an Fahrten für alle Fahrten. Je geringer die Varianz der Verbräuche der Einzelfahrten zum Bestwert der Fahrt war, desto niedriger war der Verbrauch für alle Fahrten. Bei den besten Lösungen konnte eine plausible unterschiedliche Nutzung von Nähe oder Ferne sowie von Frei- zu Vorhalteenergie bei der Modifikation der unteren und oberen Schaltgrenzen festgestellt werden. Zusätzlich konnte das entwickelte Optimierungsverfahren für die **Variation des EDLC-Energieinhaltes** um eine Dimension erweitert werden. Ein vom Abstand abhängiges Verfahren zur Modulation der Schaltgrenzen erzielt in weiten Bereichen des Speicherinhaltes ein Verbrauchsminimum. Die Nutzung der Zustandsgrößen des Antriebes für die Modulation führt nur ab einem EDLC-Energieinhalt von ca. 60 % des in den Berechnungen verwendeten Wertes zu niedrigeren Verbräuchen bei einer konstant höheren Standardabweichung der Lösungen. Sinkende Kosten für die EDLC und die mit kleineren Speichern sinkende vielseitige Einsetzbarkeit der Fahrzeuge stellen die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse jedoch in Frage. Die Verbräuche wurden mit anderen charakteristischen Größen aus der Simulation statistisch korreliert, um mögliche Ungereimtheiten im Modell entdecken zu können. Besonderes Augenmerk wurde auf eine genaue **Korrektur des Energieinhaltes im Energiespeicher** gelegt, da der Ladezustand SOC nach den Fahrten je nach Regelungsansatz stark unterschiedlich sein kann. Es wurde die Erfassungsgenauigkeit für die GPS-Position überprüft und durch Verschieben der Position um 10 m bis 20 m in Richtung der Zwangshalte das Ergebnis verbessert.

Seitens der Emissionen wird beim betrachteten Euro 3 Motor ohne Partikelfilter eine Verbrauchsverringerung durch die Korrektur der Schaltgrenzen tendenziell zu höheren PM10 und CO-Emissionen führen, auch daher wird eine nachgeschaltete Abgasreinigung trotz Phlegmatisierung des Motors nicht zu vermeiden sein. Im Grunde kann aber ein Euro 3 Motor durch eine Nachrüstung einer SCR sehr schadstoffarm betrieben werden (232).

Die Analyse der telematischen Möglichkeiten der Datenversorgung für die Bestimmung des Abstandes zu potentiellen Zwangshalten hat ergeben, dass ein **GNSS** – besonders wegen der Einführung von GPS2 (aber auch Galileo) – besser geeignet für die **Positionsbestimmung** des Fahrzeuges ist, weil sich bei der Odometrie die Fehler über den Weg summieren und eine Kalibrierung erforderlich ist. Die Positionen der potentiellen Zwangshalte können im GIS auf Basis einer (virtuellen) Begehung ermittelt über ein *Intermodal Transport Control System* ITCS (Betriebsleitsystem) bzw. die Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit über Daten vorausfahrender Busse verbessert werden, bevor sie über Schnittstellen in das taktische Energiemanagement-System der Fahrzeuge überspielt werden. Für eine Vorausschau im erforderlichen Zeitfenster würde bordeigene Sensorik alleine ohne Vernetzung mit anderen Verkehrsteilnehmern zu kurzfristige Informationen liefern. Auch ist eine Bus-zu-Bus Kommunikation wegen zu wenig dichten Intervallen und zufällig auftretenden Staus weniger hilfreich. Zusätzlichen Stau-Sensorik scheint bei Lichtsignalanlagen nötig, um die Prognosen für eine Durchfahrtszeit zu ergänzen, auch wenn eine vom Bus ausgelöste Vorrangschaltung eingerichtet wurde. Die **Systemarchitektur** mit der Sammlung, Konsolidierung und Verbreitung der für das taktische Energiemanagement erforderlichen Daten konnte, gegen die Anforderungen gestellt, verifiziert werden. Eine Übermittlung neuer Datensätze in die Fahrzeuge sollte über Delta-Daten erfolgen um die Bandbreiten der drahtlosen Kommunikation nicht zu überfordern. Einsparungen des taktischen Energiemanagements müssen in der Praxis mithilfe von Flottenmanagementsystemen überprüft werden. Für die **Wirtschaftlichkeit** ist die **Flottengröße** wesentlich, wenn ein vom Abstand abhängiges Verfahren zur Modifikation der Schaltgrenzen der Hystereseregulation benutzt wird und die Telematik-Hardware nicht bereits in

Form eines Betriebsleitsystems existiert. Bei z. B. 400 Fahrzeugen beträgt ohne vorhandenes Betriebsleitsystem die noch wirtschaftliche Investition ca. 12.000 € pro Bus. Es entstehen jedoch über die zentralen Einrichtungen zusätzlich **Synergien**, da Flottendaten anfallen und für die **Flottensteuerung** benutzt werden können. Ein rein auf Zustandsfaktoren des seriell-hybriden Antriebssystems aufbauendes taktisches Energiemanagement, hat Mehrkosten für zusätzliche Sensorik und benötigt dafür keine GPS-Daten. Eine zentrale Stelle zum Abgleich der Faktoren für die Einflussgrößen und das damit verbundene **Kraftstoffmanagement** ist aber dennoch nötig, auch wenn die Datenübertragung am Betriebshof erfolgen kann. Geringere zentrale Investitionen erlauben daher den Einsatz der Methode der Modulierung der Schaltgrenzen über Zustandsfaktoren bereits bei kleineren Flotten. Über die Nutzung des Abstandseinflusses bei der Modulation der Schaltgrenzen der Hystereseregulation kann die **Speichergröße** und die Standardabweichung der erzielten Lösungen **verringert** werden, auch wenn einzelne Lösungen mit beiden Einflüssen existieren die geringere Verbräuche bei kleineren Speichern ermöglichen.

14 VERZEICHNISSE

14.1 EINFLUSSFAKTOREN IN DER MONTE-CARLO-SIMULATION

Formel 34 Einflussfaktoren für die Modulation der Schaltgrenzen der Hystereseregulung

Nummer	Beschreibung
0	Faktor für den Einfluss der Laufzeit des Motor Generator-Satzes auf die obere SOC-Grenze
1	Faktor für den Einfluss der Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Motor Generator-Satzes auf die obere SOC-Grenze
2	Faktor für den Einfluss der aktuellen Stromstärke (Lade-, Entladeleistung) EDLC auf die obere SOC-Grenze
3	Faktor für den Einfluss des aktuellen Energieinhaltes (SOC) des EDLC auf die obere SOC-Grenze
4	Faktor für den Einfluss der Laufzeit des Motor Generator-Satzes auf die untere SOC-Grenze
5	Faktor für den Einfluss der Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Motor Generator-Satzes auf die untere SOC-Grenze
6	Faktor für den Einfluss der aktuellen Stromstärke (Lade-, Entladeleistung) EDLC auf die untere SOC-Grenze
7	Faktor für den Einfluss des aktuellen Energieinhaltes (SOC) des EDLC auf die untere SOC-Grenze
8	Faktor für den Einfluss der Ferne zum gewichteten Mittel der bevorstehenden potentiellen Zwangshalte auf die untere SOC-Grenze
9	Faktor für den Einfluss der Ferne zum gewichteten Mittel der bevorstehenden potentiellen Zwangshalte auf die mittlere SOC-Grenze
10	Faktor für den Einfluss der Ferne zum gewichteten Mittel der bevorstehenden potentiellen Zwangshalte auf die obere SOC-Grenze
11	Summenfaktor für die Einflüsse 4 bis 7 auf die untere SOC Grenze
12	Summenfaktor für die Einflüsse 4 bis 7 auf die mittlere SOC Grenze
13	Summenfaktor für die Einflüsse 0 bis 3 auf die obere SOC Grenze
14	Faktor für den Einfluss der Nähe zum gewichteten Mittel der bevorstehenden potentiellen Zwangshalte auf die untere SOC-Grenze
15	Faktor für den Einfluss der Nähe zum gewichteten Mittel der bevorstehenden potentiellen Zwangshalte auf die mittlere SOC-Grenze
16	Faktor für den Einfluss der Nähe zum gewichteten Mittel der bevorstehenden potentiellen Zwangshalte auf die obere SOC-Grenze
17	Faktor für den Einfluss der für das Verzögern im EDLC freizuhaltende Energie auf die untere SOC-Grenze
18	Faktor für den Einfluss der für das Verzögern im EDLC freizuhaltende Energie auf die mittlere SOC-Grenze
19	Faktor für den Einfluss der für das Verzögern im EDLC freizuhaltende Energie auf die obere SOC-Grenze
20	Faktor für den Einfluss der für das Wiederanfahren im EDLC erforderlichen Energie auf die untere SOC-Grenze
21	Faktor für den Einfluss der für das Wiederanfahren im EDLC erforderlichen Energie auf die mittlere SOC-Grenze
22	Faktor für den Einfluss der für das Wiederanfahren im EDLC erforderlichen

	Energie auf die obere SOC-Grenze
23	Berücksichtigung des Einflusses der frei- oder vorzuhaltenden Energie auf die untere SOC-Grenze (0/1)
24	Berücksichtigung des Einflusses der frei- oder vorzuhaltenden Energie auf die mittlere SOC-Grenze (0/1)
25	Berücksichtigung des Einflusses der frei- oder vorzuhaltenden Energie auf die obere SOC-Grenze (0/1)
26	Korrekturfaktor Abstand zu den potentiellen Zwangshalten

14.2 ABKÜRZUNGEN

ADAS	Advanced Driver Assistance System
AGPS	Assisted GPS
AGR	Abgasrückführung
APU	Auxiliary Power Unit
BAE	BAE Systems (British Aerospace)
BBC	Buck-Boost Converter (Hochsetz-Tiefsetz-Steller)
BEV	Battery Electric Vehicle
CAN	Controller Area Network
CPU	Central Processing Unit – Prozessor
CVT	Continuously Variable Transmission
DGPS	Differential Global Positioning System
DoD	Depth of Discharge - Entladetiefe
DP	Dynamic Programming
DPF	Dieselpartikelfilter
DSRC	Dedicated Short Range Communication
EDLC	Electrolytic Double Layer Capacitor: Ultracap oder Supercap
EURO	Abgasnorm Verordnung 715/2007/EG
Genset	Motor-Generator-Satz, Generator und VKM
EMF	Back electro-motive force
EPA	Environmental Protection Agency
FMS	Fleet Management System
GIS	Geographisches Informationssystem
GM	General Motors
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
GPS	Global Positioning System
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
HEF	Hybrid-Elektrisches Fahrzeug
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HSD	Hybrid synergy drive
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
ITCS	Intermodal Transport Control System
Kfz	Kraftfahrzeug
LIC	Lithium Ion Capacitors
LFP	Lithiumferrophosphat
Li-Ion	Lithium Ionen
LiFePO4	Lithium Eisenphosphat

LiCo	Lithium Cobalt
LiMn	Lithium Mangan
LSA	Lichtsignalanlagen
MC	<i>Monte-Carlo</i>
MG o. M/G	Motor-Generator
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
NaS	Natrium Schwefel
NFZ	Nutzfahrzeug
NiCd	Nickel Cadmium
NiMH	Nickel Metall-Hydrid
NMEA	National Marine Electronics Association
NN	Neuronale Netzwerke
NO _x	Stickoxide (NO, NO ₂)
NP	nichtdeterministisch polynomielle Zeit
OEM	Original Equipment Manufacturer
OSI	Open Systems Interconnection Model
ÖPNV	Öffentlicher Personen Nahverkehr
PBE	Plastic Bonded Electrode
Pkw	Personenkraftwagen
PID	Proportional Integral Differential
PM	Particulate Matter (Feinstaub)
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Machine
PSA	Peugeot Société Anonyme
PSOC	Partial State of Charge
RDS-TMC	Radio Data System Traffic Message Channel
RBL	Rechnergesteuertes Betriebsleitsystem
Redox	Reduktion-Oxidation
REEV	Range Extended Electric Vehicle
RDS-TMC	Radio Data System-Traffic Message Channel
RMS	Root Mean Square (Wurzel aus dem Quadrat der Werte)
RTK	Real Time Kinematic
SMES	Supraleitende Magnetische Energiespeicher
SOC	State of Charge, Ladezustand Energiespeicher
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SOH	State of Health, aktuelle Leistungsfähigkeit des Energiespeichers in Bezug auf die Nennkapazität
SRM	Switched Reluctance Machine
Synfuel	synthetic fuel
Syngas	synthetic gas
THS	<i>Toyota</i> Hybrid Synergy
UKW	Ultrakurzwelle
UTC	Coordinated Universal Time
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WAAS	Wide Area Augmentation System
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments nach IEEE 802.11p, IEEE 1609
WiFi	WLAN Produkte der Wi-Fi Allianz nach 802.11
WGS	World Geodetic System

14.3 LITERATURVERZEICHNIS (NACH ISO 690)

1. *Backward simulation - A tool for designing more efficient mechatronic systems.* **Liermann, Mathias.** München : Modelica Association, 2012.
2. **Stan, Cornel.** *Alternative Antriebe für Automobile - Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger.* s.l. : Springer, 2005.
3. **Boshart Consulting.** *Sensitivitätsanalyse - Papiercomputer.* Bern : s.n., 2007.
4. *What goes into a climate model?* **Schmidt, Gavin.** Vancouver : s.n., 2014. TED2014 The Next Chapter.
5. *Comparative LCA of electric, hybrid, LPG and gasoline cars in Belgian context.* **Boureima, Fayçal-Siddikou, et al., et al.** Stavanger : s.n., 2009. EVS24.
6. *Telematics based energy management strategies for hybrid electric vehicles (HEVs) with the special focus on heavy vehicle urban traffic (lorries and buses).* **Cebrat, Gerfried.** Katowice : TST06 Transport Systems Telematics, 2006.
7. **ZF Friedrichshafen AG.** *Mobilität erfahren - Busantriebstechnik.* [Online] "). 8 2012. [Zitat vom: 3. 12 2013.]
http://www.zf.com/media/media/de/document/corporate_2/downloads_1/flyer_and_brochures/bus_driveline_technology_flyer/TB-Mobilitaet_erfahren_DE.pdf.
8. **Voith Turbo GmbH & Co. KG.** *Voith Antriebskomponenten auf der Busworld 2013 in Kortrijk.* [Online] 9. 10 2013. [Zitat vom: 3. 12 2013.]
9. *Doppeldeckerbus Type DDH 200/43/16: Betriebsnummer 8290 .* [Online] Wiener Linien. [Zitat vom: 15. 3 2013.] <http://www.wienerlinien.at/eportal/ep/contentView.do/pageTypeId/9424/programId/10713/contentTypeId/1001/channelId/-22351/contentId/15421>.
10. **Zhen, J-J, Wang, J-H, und Huang, Z-H.** *Effect of the compression ration on the performance and combustion of a natural-gas direct injection engine.* *Journal of Automobile Engineering.* no. 1, vol. 223 2009, S. 85-98.
11. **Westport Power Inc.** *core-technologies.* [Online] [Zitat vom: 26. 6 2012.]
<http://www.westport.com/is/core-technologies/>.
12. **Kurpjuweit, Klaus.** *Versuch mit Wasserstoffbussen verpufft.* *Der Tagesspiegel Berlin.* 8. 3 2009.
13. *Efficiency of Hydrogen Fuel Cell, Diesel-SOFC-Hybrid and Battery Electric Vehicles.* **Bossel, Ulf.** 2003. European Fuel Cell Forum.
14. **U.S. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy.** *Fuel Cell Fac Sheet, Fuel Cell Technologies Program.* 2010.
http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fct_h2_fuelcell_factsheet.pdf.
15. *Reforming and SOFC system concept.* **Spitta, Christian, Spieke, Carsten und Heinzl, Angelika.** Luzern : 10th European SOFC Forum 2012, 2012.
16. *Advanced Fuel Reformer Development.* **Roychoudhury, Subir (Precision Combustion Inc.).** Washington : Shipboard Fuel Cell Workshop, 2011.
17. **Huppertz, Harald.** *Hybridantrieb.* [Online] Kfz-Tech. [Zitat vom: 4. 12 2012.]
<http://www.kfz-tech.de/Hybridantrieb.htm>.
18. **Peter.** *VW Bus T2 Hybrid 1977 - Hybridbus von VW.* [Online] [Zitat vom: 26. 10 2010.]
<http://de.paperblog.com/vw-bus-t2-hybrid-1977-hybridbus-von-vw-76186/>.

19. **Kröner, Tim.** Hybridfahrzeug-Entwicklung. [Online] [Zitat vom: 4. 12 2012.] <http://www.autos-hybrid.de/hybridfahrzeug-entwicklung.html>.
20. **Renz, Sebastian.** Audi 100 Avant Duo von 1989: Youngtimer als Pionier der Hybridtechnik. [Online] 16. 4 2009. [Zitat vom: 4. 12 2012.] <http://www.auto-motor-und-sport.de/eco/audi-100-avant-duo-von-1989-youngtimer-als-pionier-der-hybridtechnik-1016386.html>;
21. *Strukturvarianten von Hybridantrieben.* **Wallentowitz, H., et al., et al.** München : s.n., 1999. VDI-Tagung "Hybridantriebe".
22. **Blessing, Uli Christian.** Audi Duo Hybrid 1997. [Online] [Zitat vom: 4. 12 2012.] <http://www.hybrid-autos.info/Hybrid-Fahrzeuge/Audi/audi-duo-hybrid-1997.html>.
23. **Forum Insight Central: Honda Insight.** Interactive Encyclopedia. [Online] VerticalScope Inc. [Zitat vom: 25. 4 2013.] <http://www.insightcentral.net/encyclopedia/index.html>.
24. **relayridesblog.** History of the Toyota Prius. [Online] 10. 7 2013. [Zitat vom: 3. 12 2013.] <http://blog.relayrides.com/2013/07/history-of-the-toyota-prius/>.
25. **Murphy, John und Dolan, Matthew.** Toyota Builds Thicket of Patents Around Hybrid To Block Competitors. [Online] Wall Street Journal, 1. 7 2009. [Zitat vom: 23. 7 2013.] <http://online.wsj.com/article/SB124640553503576637.html>.
26. Plug-In Hybrids: State Of Play, History & Players. [Online] CalCars. [Zitat vom: 10. 8 2012.] <http://www.calcars.org/history.html>,
27. **Daimler AG.** Mercedes-Benz Sprinter mit Hybrid-Antrieb. [Online] Daimler AG, 7. 7 2011. [Zitat vom: 2. 2 2013.] media.daimler.com/dcmmedia/0-921-656174-49-818450-1-0-0-818457-0-0-11694-656637-0-1-0-0-0-0-0.html.
28. **Chris.** Goodyear Innovation Award 2011: Diesel-Hybrid Peugeot 3008 HYbrid4 ausgezeichnet. [Online] 25. 3 2011. [Zitat vom: 23. 7 2013.] <http://www.grueneautos.com/2011/03/goodyear-innovation-award-2011-peugeot-3008-hybrid4-ausgezeichnet/>.
29. **GreenCarCongress.** Volkswagen combines XL1 powertrain with up! for the twin up! concept plug-in diesel hybrid; 214 mpg. [Online] 20. 11 2013. [Zitat vom: 3. 12 2013.] www.greencarcongress.com/2013/11/20131120-twinup.html.
30. **Peugeot.** Hybrid Air, an innovative full hybrid gasoline system. [Online] 22. 1 2013. [Zitat vom: 23. 10 2014.] <http://www.psa-peugeot-citroen.com/en/automotive-innovation/innovation-by-psa/hybrid-air-engine-full-hybrid-gasoline>.
31. **Dumonceau, Geraldine.** MEDIA BACKGROUNDER Buses today and tomorrow. *UITP*. [Online] 2012. [Zitat vom: 21. 10 2014.] <http://www.uitp.org/sites/default/files/Buses%20today%20and%20tomorrow.pdf>.
32. **UITP International Association of Public transport.** Buses Today & Tomorrow - Media Backgrounder. [Online] 27. 5 2010. [Zitat vom: 2. 8 2013.] http://www.uitp.org/news/pics/pdf/MB_BusesToday&Tomorrow2.pdf.
33. **ZF-Friedrichshafen AG.** ZF-Elektroportalachse AVE 130 feiert Russlandpremiere. [Online] ZF, 5. 10 2012. [Zitat vom: 23. 7 2013.] http://www.zf.com/corporate/de/press/press_releases/corporation/corporation_detail.jsp?newsId=21938538.
34. **Voith Turbo GmbH & Co. KG.** Hybrid technology. [Online] 2014. [Zitat vom: 10. 5 2014.] <http://voith.com/en/products-services/power-transmission/hybrid-systems-12842.html>.
35. **Proterra.** En Route Charging Station. [Online] 2012. [Zitat vom: 10. 5 2014.] <http://www.proterra.com/index.php/products/productDetail/C23/>.

36. **RWS Railway Service GmbH.** *Presentation of the Hybrid Trolley Bus.* 2010. S. 1-20.
37. *E-Mobilität und die Rolle des Verbrennungsmotors.* **Eichlseder, Helmut.** Graz : ECO, 2012. Cleantech Innovators Club. S. 1-4.
38. *Potenziale von Hybridantrieben in mobilen Arbeitsmaschinen.* **Albers, Albert; Ott, Sascha; Seifermann, Achim; (Universität Karlsruhe Institut für Produktentwicklung).** Tagung Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen.
39. **United States Environmental Protection Agency.** Hydraulic Hybrid Technology –A Proven Approach. *EPA420-F-04-024.* [pdf]. 2004.
40. **Gray, Charles L.(Environmental Protection Agency).** Hydraulic Hybrids. [Online] 19. 10 2006. [Zitat vom: 2. 8 2013.]
<http://files.harc.edu/Projects/Transportation/HydraulicHybridsGray.pdf>.
41. *Optimal Power Management for a Hydraulic Hybrid .* **Wu, Bin, et al., et al.** 2004.
42. **Elahinia, Mohammad (University of Toledo University Transportation College of Engineering).** *Reducing Noise and Vibration of Hydraulic Hybrid and Plug-In Hybrid Electric Vehicles - Phase IV: Experimental Evaluation of Control of an MR Mount.* 2012.
43. **Halpert, Julie.** Chrysler Experiments with Hydraulic Hybrid Minivans. [Online] MIT Technology Review, 1. 4 2011. [Zitat vom: 23. 7 2013.]
<http://www.technologyreview.com/energy/37230/>.
44. **admin.** Mercedes Citaro G BlueTec Hybrid. [Online] 7. 8 2009. [Zitat vom: 23. 7 2013.]
<http://www.omnibusarchiv.de/include.php?path=content&mode=print&contentid=269>.
45. **Daimler Buses North America.** Orion VII Hybrid Product Overview. [pdf]. 2009.
46. **Cervantes, Valery.** Overview on hybrid buses. [Online] 4. 3 2008. [Zitat vom: 25. 7 2013.]
http://www.compro-eu.org/doc/COMPRO%2520workshop%2520nantes/PPTs/h_irisbus_hybride_Valery_Cervantes.ppt.
47. **Hondius, H.** Busse mit Elektroantrieb heute. *Stadtverkehr.* 10 11.
48. **BAE Systems.** HybriDrive E-Series. [Online] 10. 4 2013. [Zitat vom: 10. 5 2014.]
<http://hybridrive.com/pdfs/HybriDrive%20Series-E%20lead%20data%20sheet.pdf>.
49. **Maierhofer, Bernd (MAN Nutzfahrzeuge AG).** Präsentation MAN Lion's City Hybrid. IAA Hannover : s.n., 2010.
50. **Projekt IDEAS.** Innovativer Dieselelektrischer Hybridantrieb für Stadtbusse. *Verkehr und Technik.* 2006, 3, S. 103.
51. **Kersch S., Hipp E., Lexen G. (MAN Nutzfahrzeuge AG, München).** Effizienter Hybridantrieb mit Ultracaps für Stadtbusse. 4. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik : s.n., 2005.
52. **admin.** Omnibusarchiv. *Mercedes Cito.* [Online] 8. 7 2010. [Zitat vom: 24. 7 2013.]
<http://www.omnibusarchiv.de/include.php?path=article&contentid=653>.
53. **Wendt, Thomas.** Bus-Bild.de. *Mercedes-Benz O 520 (Cito) Fotos.* [Online] [Zitat vom: 24. 7 2013.] <http://www.bus-bild.de/name/galerie/kategorie/alternative-antriebe~dieselelektrischer-antrieb~mercedes-benz-o-520-cito.html>.
54. **admin.** Orion VII Hybrid. [Online] 3. 11 2007. [Zitat vom: 27. 8 2013.]
<http://www.omnibusarchiv.de/include.php?path=content&mode=print&contentid=234>.

55. **VDL Bus & Coach bv.** Technische Daten EURO 6. [Online] [Zitat vom: 27. 8 2013.] <http://www.vdlbuscoach.com/Producten/Openbaar-vervoer/Citea/Technische-specificatie.aspx>.
56. **Green Car Congress.** Mitsubishi Fuso Introduces Aero Star Eco Series Hybrid Bus. [Online] 27. 9 2007. [Zitat vom: 27. 8 2013.] <http://www.greencarcongress.com/2007/09/mitsubishi-fuso.html>.
57. **Faltenbacher, M., Rock, A. und Vetter, O.** *Abschlussbericht Plattform Innovative Antriebe Bus*. PE INTERNATIONAL AG. 2011.
58. **Johansson, Per-Martin.** Volvo's largest hybrid bus order to date. [Online] Volvo Buses, 16. 12 2010. [Zitat vom: 5. 5 2012.] http://www.volvobuses.com/bus/spain/es-es/newsmedia/pressreleases/_layouts/CWP.Internet.VolvoCom/NewsItem.aspx?News.ItemId=93969&News.Language=en-gb.
59. —. Order for 60 Volvo hybrid buses from Curitiba. [Online] Volvo Buses. [Zitat vom: 24. 7 2013.] <http://news.volvogroup.com/2011/06/16/order-for-60-volvo-hybrid-buses-from-curitiba/>.
60. **Lind, Helena (Volvo Bus Corporation).** Volvo Buses Receives Order for 475 Hybrid Buses from Quebec. [Online] Business Wire February 12, 12. 2 2013. [Zitat vom: 24. 7 2013.] <http://www.businesswire.com/news/home/20130212005679/en/Volvo-Buses-Receives-Order-475-Hybrid-Buses>.
61. **Green Car Congress.** Volvo plug-in hybrid bus with Bûsbaar rapid charging to begin field testing in Gothenburg; 75-80% reduction in fuel consumption and CO2 . *Green Car Congress*. [Online] 14. 5 2013. [Zitat vom: 20. 11 2012.] <http://www.greencarcongress.com/2013/05/volvo-20130514.html>.
62. **VCDB VerkehrsConsult.** RegioHybrid. [Online] 10. 5 2011. [Zitat vom: 24. 7 2013.] <http://www.eltis.org/docs/studies/verbundvorhaben-regiohybrid-2013-30-hybridbusse-fuer-sachsen.pdf>.
63. **MAN AG.** Pressemitteilung: MAN erhält Auftrag über 181 Busse aus Schweden. [Online] 15. 4 2014. [Zitat vom: 10. 5 2014.] <http://www.stadtbuss.de/>.
64. **Low Carbon Vehicle Partnership.** Government boosts support for low carbon buses. [Online] 26. 3 2012. [Zitat vom: 24. 7 2013.] <http://www.lowcvc.org.uk/lceb/monitoring/details.asp?id=57>.
65. **Transport for London.** Hybrid Bus Fact Sheet . [Online] 2 2012. [Zitat vom: 24. 7 2013.] http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/Hybrid_Buses_Fact_sheet.pdf.
66. **Lucas, Paul.** London makes huge hybrid bus order: will boast Europe's largest fleet. [Online] 28. 9 2012. [Zitat vom: 24. 7 2013.] <http://www.thegreencarwebsite.co.uk/blog/index.php/2012/09/28/london-makes-huge-hybrid-bus-order-will-boast-europes-largest-fleet/>.
67. **Mongin, Pierre (RATP).** The buses of the future. [Online] [Zitat vom: 24. 7 2013.] http://www.ratp.fr/en/ratp/c_10530/the-buses-of-the-future/.
68. **MAN Nutzfahrzeuge AG.** MAN Lion's City Hybrid überzeugt Pariser Verkehrsbetriebe. [Online] MAN, 21. 3 2013. [Zitat vom: 24. 7 2013.] http://www.mantruckandbus.de/de/press__media/Pressemitteilung_185024.html.
69. **Danielsson, P. (Volvo) .** *The Volvo BRT experience*. 2011. S. 1-29.

70. **AB Volvo**. Volvo 7700 Hybrid Bus. [Online] 19. 9 2008. [Zitat vom: 24. 7 2013.] <http://www.volvobuses.com/SiteCollectionDocuments/VBC/Global%20-%20ILF/Downloads/Factsheet%207700%20hybrid%20EN.pdf>.
71. **Wiesenfelder, Joe**. The Great Chevy Volt Hybrid Mishap Explained. [Online] cars.com, 11. 10 2010. [Zitat vom: 24. 12 2013.] <http://blogs.cars.com/kickingtires/2010/10/the-great-chevy-volt-hybrid-mishap-explained.html>.
72. **VOITH**. Solaris and Voith Present Urbino 18 DIWAhybrid. [Online] 25. 3 2011. [Zitat vom: 10. 4 2014.] <http://www.webwire.com/ViewPressRel.asp?aId=134536>.
73. **Mi, Chris (University of Michigan)**. Hybrid Electric Vehicles: Control, Design, and Applications. [Online] 15. 12 2005. [Zitat vom: 24. 7 2013.] http://groups.engin.umd.umich.edu/vi/w5_workshops/Chris_Mi_handout.pdf.
74. *Integrated Vehicle Thermal Management for Advanced Vehicle Propulsion Technologies Preprint*. **Bennion, K. und Thornton, M. (National Renewable Energy Laboratories)**. Detroit : s.n., 2010. SAE 2010 World Congress.
75. **Toyota Motor Corporation, Public Affairs Division**. EV World. *Toyota Hybrid System THS II*. [Online] 9. 5 2003. [Zitat vom: 24. 7 2013.] <http://www.evworld.com/library/toyotahs2.pdf>.
76. *Modeling Of The THS-II Series/Parallel Power Train and its Energy Management System*. **Mansour, Charbel, Clodic, Denis und (Center for Energy and Processes, MINES ParisTech)**. Budapest : s.n., 2010. FISITA 2010 World Automotive Congress.
77. **Catthoor, Raf**. Case study: Toyota Hybrid Synergy Drive. [Online] 5. 5 2011. [Zitat vom: 28. 10 2014.] http://www.ae.pwr.wroc.pl/filez/20110606092430_HEV_Toyota.pdf.
78. **Hoffman, Peter**. *Hybridantriebe: Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft*; . s.l. : Springer-Verlag, 2010.
79. *Comparative Assessment of Hybrid Vehicle Power Split Transmissions*. **Miller, John (J-N-J Miller P.L.C Design Services)**. 2005. 4th VI Winter Workshop Series. http://groups.engin.umd.umich.edu/vi/w4_workshops/Miller_W04.pdf.
80. *Interim Evaluation Results from New Flyer/Allison Hybrid Buses at King County Metro*. **Chandler, K., et al., et al.** Columbus, Ohio : s.n., 2005. American Public Transportation Association Bus and Paratransit Conference.
81. **Chandler K., Walkowicz K.** *King County Metro Transit Hybrid Articulated Buses: Interim Evaluation Results; Technical Report NREL/TP-540-39742*. 2006.
82. The e-Traction system - flexible and efficient. [Online] e-Traction. [Zitat vom: 25. 7 2013.] <http://www.e-traction.eu/>.
83. Whisper. [Online] e-traction, 2012. [Zitat vom: 15. 8 2012.] http://www.e-traction.com/whisper_1g.htm.
84. **e- Traction Europe BV**. Specifications. [Online] [Zitat vom: 15. 8 2012.] <http://www.e-traction.com/specifications.htm>.
85. *Development of In-Wheel Type Integrated Motor Axle Unit*. **Suzuki, M. und Wang, D.** 2005, NTN TECHNICAL REVIEW No.73.
86. **LOTUS Engineering**. The Effect of Hub Motors on Vehicle Dynamics. [Online] 14. 3 2011. [Zitat vom: 25. 7 2013.] <http://www.proteanelectric.com/wp-content/uploads/2011/12/protean-Services.pdf>.
87. **Merkelbach, Bettina**. Mercedes-Benz Hybrid Bus with Four Electric Wheel Hub Motors in Operation. [Online] ATZ online. [Zitat vom: 25. 7 2013.]

<http://www.atzonline.com/index.php;do=show/site=a4e/sid=11546767674fa3fbb3d99f5130175430/%20alloc=1/id=9442>.

88. **Blessing, Uli Christian.** Citaro G BlueTec Hybrid 2010. [Online] Hybrid-Autos.info, 2010. [Zitat vom: 25. 7 2013.] <http://www.hybrid-autos.info/Nutzfahrzeuge/Mercedes-Benz/citaro-g-bluetec-hybrid-2010.html>.

89. **BusfahrerMagazin.** Wuppertal erhält Citaro G BlueTec Hybrid. [Online] BUSFahrer, 23. 3 2012. [Zitat vom: 25. 7 2013.] <http://www.busfahrerMagazin.de/wuppertal-erhaelt-citaro-g-bluetec-hybrid-1105724.html>.

90. **Yonhap News.** World's First Production Factory for EV Powered by Direct Drive Motor in Yeonggwang. [Online] Invest Korea, 15. 2 2011. [Zitat vom: 25. 7 2013.] http://www.investkorea.org/ikwork/reg/eng/ne/index.jsp?l_unit=90202&m_unit=90306&code=1290506&no=608300004&page=13&bno=102150012&seq=131.

91. **van Zeeland, Merleen.** Weltpremiere: VDL Citea Electric. [Online] 5 2013. [Zitat vom: 3. 8 2013.] <http://www.vdlbuscoach.com/News/News-Library/Wereldprimeur--de-VDL-Citea-Electric.aspx?lang=de-DE>.

92. **Langley, Richard B.** Dilution of Precision. *GPS World*. 1999, May.

93. *Linienbusse mit Hybridantrieb – eine spannende Geschichte.* **Biermann J-W, Hartmann B. (RWTH Aachen).** Düsseldorf : s.n., 2009. IHK Innovationsforum.

94. **Popov, A., et al., et al.** Laboratory Measurement of Rolling Resistance in Truck Tyres under Dynamic Vertical Load. *Journal of Automobile Engineering*. 27. 11 2002.

95. **Rakha, H., Lucic, I., Demarchi S., Setti, J., and Van Aerde, M.** Vehicle dynamics model for predicting maximum vehicle acceleration levels. *ASCE Journal of Transportation Engineering*. 2001.

96. **Versonnen, Eddy (KdG University College).** *Tire Properties*. Antwerp : Erasmus LLP Intensive Programme, 2011.

97. **Dresdner Verkehrsbetriebe AG.** Busflotte. [Online] [Zitat vom: 23. 8 2013.] <http://www.dvb.de/de/Die-DVB-AG/Zahlen-Daten/Busflotte/#man-hybrid>.

98. **MAN Nutzfahrzeuge AG.** On-Road Bus Produktprogramm MAN Engines. [Online] 2012. http://www.man-engines.com/media/content_medien/doc/ProductRange_Bus_2012_08_120918_web_neu.pdf.

99. **MAN Truck & Bus AG.** On-Road Bus Produktprogramm / Product Range. [Online] 2. 8 2013. [Zitat vom: 24. 8 2013.] http://www.man-engines.com/media/content_medien/doc/OnRoad_Bus_PR_130802_web.pdf.

100. **MAJU ENGINEERING SERVICES SDN BHD.** ALLISON MT643 TRANSMISSION SPECIFICATION. [Online] [Zitat vom: 24. 8 2013.] http://www.messb.com.my/allison_mt_643.html.

101. **Tsirinomeny, M., et al., et al.** *Eltrafast charging compatibility of electric vehicles*. Lausanne : s.n., 2011.

102. **Iveco S.p.A.** Citelis Niederflur-Citybus 10,5 M – 2 & 3 Türen – CNG/Erdgasantrieb. [Online] 25. 7 2012. [Zitat vom: 26. 7 2013.] http://web.iveco.com/germany/collections/technical_sheets/Documents/Irisbus/Urbani/CITELIS%20CNG%2010,5m,%20IM%20AG.pdf.

103. **Dörffel, D.** *Peace-of-Mind Series Hybrid Electric Vehicle Drivetrain*. Southhampton : Transfer Thesis University of Southhampton, 2003. S. 53.

104. **MAN Nutzfahrzeuge AG.** Kurzbericht Optimierter MAN-Ultracap Bus im Linieneinsatz bei der VAG in Nürnberg. *Verkehr und Technik*. 12 2005.
105. **Rexeis, Martin, et al., et al.** *Heavy duty vehicle emissions, WP400 Final report ARTEMIS*. 2005.
106. **Sandell, L.** *Electric Bus Compendium Addendum 1, Final Report*. 1999.
107. *Measurement and Evaluation of Heating Performance of Heat Pump Systems Using Wasted Heat from Electric Devices for an Electric Bus.* **Chung-Won, Cho, et al., et al.** 2012. *Energies* 2012.
108. **Mardorf, Lutz und Menger, Peter.** *PKW-Klimaanlage mit Wärmepumpenmodus für Elektrofahrzeuge Vergleich der Kältemittel R1234yf und R134a*. Osnabrück: Hochschule Osnabrück, Labor für Angewandte Thermodynamik, 2010.
109. **Brown, Steven, Yana-Motta, Samuel und Domanski, Piotr.** Comparative analysis of an automotive air conditioning systems operating with CO₂ and R134a. *International Journal of Refrigeration*. 2002, 25.
110. **IEC International Electrotechnical Commission,** IEC 60034-1 Drehende elektrische Maschinen. *Rotating electrical machines – Part I Rating and Performance*. 2004.
111. **König, Herbert (Münchner Verkehrsgesellschaft).** Hybridbusse und Speichertechnologien im Praxistest – eine Zwischenbilanz. [Online] 12. 3 2013. [Zitat vom: 23. 8 2013.] <http://innovationskongress-bw.de/wp-content/uploads/2013/04/Vortrag-Herbert-Koenig.pdf>.
112. **MAN Nutzfahrzeuge AG.** Ökologie und Ökonomie - der Hybrid Stadtbus. [Online] 28. 5 2009. [Zitat vom: 26. 7 2013.] http://www.transport-efficiency.com/media/content_medien/doc/MAN_HybridFlyerA5_09_final.pdf.
113. —. Presseinformation Forschungsprojekt IDEAS. 2007.
114. **Seymour, F. und Benbow, E. (Ionova Technologies).** *3-D Nanofilm Asymmetric Ultracapacitor; Annual Merit Review*. s.l.: DOE Vehicle Technologies Program, 2012.
115. **Lindenkamp, Nils.** *Strategien zur Reduzierung der NO_x- und Partikelemissionen eines Dieselhybridfahrzeugs*. s.l.: Sierke Verlag, 2011.
116. **Ranganathan, Shefail (Environmental and Energy Study Institute).** *Hybrid Bus Fact Sheet*. Washington DC: s.n., 2007.
117. **Volkswagen AG.** Self-study programme 336. *The catalytic coated diesel particulate filter- Design and Function*. [Online] 10. 3 2005. [Zitat vom: 14. 8 2013.] http://www.volkswagen.net/technik/ssp/ssp/SSP_336.pdf.
118. **Hausberger, Stefan.** *Kolloquium*. TU-Graz, 6. 3 2013.
119. **HJS Emission Technology GmbH & Co KG.** Non Road Diesel-Partikelfilter -Modulares SMF-AR System - Einbaurichtlinie. [Online] 13. 4 2013. [Zitat vom: 14. 8 2013.] http://www.hjs.com/download/einbaurichtlinie_smf_ar.pdf.
120. **Elektronik), Hinterberger Michael (Technische Universität Graz Institut für.** Bussystem in Kraftfahrzeugen. [Online] 25. 4 2007. [Zitat vom: 14. 8 2013.] <http://alt.ife.tugraz.at/LV/upprog/Pdfs/BUSSYSTEME.pdf>.
121. **MatrixMultimedia.** Automotive electronics – CAN and LIN buses. [Online] 2. 2 2006. [Zitat vom: 14. 8 2013.] <http://www.matrixmultimedia.com/resources/files/misc/presentation%20-%20CAN%20bus.pdf>.

122. **news staff.** Breakthrough Electric Powertrain Targets Buses And Trucks. [Online] Auto Electronics, 21. 4 2009. [Zitat vom: 25. 7 2013.]
<http://autoelectronics.com/powertrain/electric-powertrain-0421/>.
123. **EMT of Madrid.** Madrid's public transportation company introduced a new CNG hybrid bus. [Online] 9. 3 2011. [Zitat vom: 25. 7 2013.]
<http://www.ngvjourn.com/en/markets/item/4400-madrids-public-transportation-company-introduced-a-new-cng-hybrid-bus>.
124. **OMB International.** About us. [Online] Gruppo Brescia Mobilità S.p.A, 2011. [Zitat vom: 25. 7 2013.] <http://ombinternational.it/en/about-us>.
125. **Brescia Mobilità.** Gruppo Brescia Mobilità. [Online] [Zitat vom: 25. 7 2013.]
<http://www.bresciamobilita.it/category/gruppobresciamobilita/>.
126. **Voelcker, John.** FedEx Tests Wrightspeed Electric Trucks With Diesel Turbine Range Extender. *Green Car Reports*. [Online] 14. 10 2014. [Zitat vom: 23. 10 2014.]
http://www.greencarreports.com/news/1094920_fedex-tests-wrightspeed-electric-trucks-with-diesel-turbine-range-extender.
127. **Matheys J., Autenboer, W. Van.** *SUBAT : SUSTAINABLE BATTERIES Work package 5 : Overall Assessment Final Public Report SUBAT Partnership*. 2005.
128. **Boyes, John.** Technologies for Energy Storage, Flywheels and Super Conducting Magnetic Energy Storage. [Online] 2000. [Zitat vom: 18. 11 2013.]
<http://de.scribd.com/doc/182065567/756082-pdf>.
129. **Frankel, Andrew.** The future of hybrid road cars. *Motorsportmagazine*. [Online] 18. 1 2012. [Zitat vom: 18. 11 2013.] <http://www.motorsportmagazine.com/road-cars/opinions/the-future-of-hybrid-road-cars/>.
130. **Bossel, Ulf.** Thermodynamic Analysis of Compressed Air Vehicle Propulsion. *European Fuel Cell Forum*. [Online] 2009. [Zitat vom: 18. 11 2013.]
<http://www.radioamatore.info/attachments/article/1600/Thermodynamic%20Analysis%20of.pdf>.
131. **Elahinia, Mohammad.** Reducing Noise and Vibration of Hydraulic Hybrid and Plug-In Hybrid Electric Vehicles - Phase IV: Experimental Evaluation of Control of an MR Mount . *The University of Toledo University Transportation Center*. [Online] 2011. [Zitat vom: 18. 11 2013.]
<http://www.utoledo.edu/research/ututc/docs/Elahinia%20Final%20Report%2002-2012.pdf>.
132. **Mihailescu, Bogdan und Svasta, Paul, Varzaru, Gaudențiu.** Hybrid Supercapacitor-Battery Electric System with Low Electromagnetic Emissions for Automotive Applications. *U.P.B. Sci. Bull. C*, 2013, Bd. 75, 2.
133. **Bartmann, Matthias (BASF SE).** BASF schließt Lizenzvereinbarung zum Erwerb der Lithiumeisenphosphat-Technologie (LFP) mit LiFePO₄+C ab. [Online] 13. 3 2012. [Zitat vom: 4. 8 2013.] <http://www.basf.com/group/pressemitteilungen/P-12-181>.
134. **BASF.** Solutions for enhanced battery performance. [Online] 11. 7 2013. [Zitat vom: 24. 8 2013.] http://www.catalysts.pro/downloads/public/pdfs/Battery%20Materials/82013BF-9887_Battery_Materials_Brochure.pdf.
135. **Wu, Borong, Ren, Yonghuan und Li, Ning.** LiFePO₄ Cathode Material. [Buchverf.] Seref Soyly. *Electric Vehicles - The Benefits and Barriers*. 2012.
136. **Härri, Vinzenz (Hochschule Technik und Architektur Luzern).** Extrait du BULLETIN ElectroSuisse des électriciens suisses . [Online] 1 1999. [Zitat vom: 25. 7 2013.] <http://solar-club.web.cern.ch/solar-club/Textes/SEV/SEV019925.html>.

137. **Härri, Vinzenz, et al., et al.** *Kleinbus "Tohyco-Rider" Mit Sam-Superkapazitätspeicher; Schlussbericht*. Ittigen : Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr und Kommunikation, 2008.
138. **A123 systems**. AHR32113 Nanophosphate High Power Lithium Cell. [Online] [Zitat vom: 18. 11 2013.]
http://info.a123systems.com/Portals/133376/content/data%20sheets/a123%20datasheet_ahr32113m1ultra-b.pdf.
139. **Toyota**. Lithium-Ion Battery. [Online] 2. 3 2010. [Zitat vom: 20. 11 2013.]
<http://www.toyota.com/esq/vehicles/batteries/lithium-ion-battery.html>.
140. **Blanco, Sebastian**. Toyota upping lithium-ion battery production 6x for introduction to Prius family. [Online] 20. 5 2013. [Zitat vom: 20. 11 2013.]
<http://green.autoblog.com/2013/05/20/toyota-upping-lithium-ion-battery-production-6x-for-introduction/>.
141. **Hess, Bettina (MVG)**. 3. Hybridbus für Vergleichstests bei SWM/MVG. [Online] 7. 4 2011. [Zitat vom: 25. 7 2013.] http://www.muenchenfuerklimaschutz.de/wp-content/uploads/07042011_MVGPressemeldung_Hybridbusse.pdf.
142. **Iveco S.p.A.** Iveco Irisbus: Rekordauftrag für Hybrid Busse. [Online] 18. 4 2012. [Zitat vom: 25. 7 2013.] <http://web.iveco.com/switzerland-de/presse/veroeffentlichungen/Pages/IvecoIrisbusRekordauftragf%C3%BCrHybridBusse.aspx>.
143. **Rubner, Jeanne (Siemens)**. Mit Bremskraft beschleunigen. [Online] [Zitat vom: 25. 7 2013.] http://www.siemens.com/innovation/apps/pof_microsite/_pof-fall-2010/_html_de/mit-bremskraft-beschleunigen.html.
144. **Vossloh North America**. Hybrid buses: Hybrid technology from Vossloh Kiepe: propulsion systems for economical, clean and quiet urban transportation . [Online] [Zitat vom: 25. 7 2013.] http://www.vossloh-north-america.com/cms/en/eco_buses_vehicles/hybrid_buses/hybrid_buses.html.
145. **Kanbara, Teruhisa, Matsui, Tooru und Takeyama, Kenichi**. *Ionenleitender Polymerelektrolyt, Verfahren zur Herstellung des Elektrolyts und seine Verwendung in Kondensatoren*. DE69533082T2 Deutschland, 4. 11 2004.
146. **Herzig, Tobias**. *Die Synthese und Charakterisierung neuer Elektrolyte für Tieftemperaturanwendungen in elektrochemischen Doppelschichtkondensatoren*. Regensburg : Universität Regensburg, 2007.
147. **elcap**. Wikimedia. *Prinzipdarstellung der Ladungen an einer Helmholtz-Doppelschicht*. [Online] 5. 6 2011. [Zitat vom: 21. 10 2014.]
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Doppelschicht-Prinzipdarstellung.png>.
148. *Ultracap Module, leistungsfähige Energiespeicher für Hybridfahrzeuge*. **Kuschel, Michel, Staib (EPCOS)**. Braunschweig : s.n., 2004. Hybrid Symposium.
149. **alfatex**. Boostcap Ultracapacitors by Maxwell - Large Cells from 650 Farad to 3000 Farad. [Online] 19. 5 2010. [Zitat vom: 25. 7 2013.]
http://www.alfatec.de/fileadmin/Downloads/Maxwell/Large_Cells_650_F_to_3000_F-_May_2010.pdf.
150. **Lipka, Steve (University of Kentucky und Research), Center for Applied Energy**. Electrochemical Power Research. [Online] 2013. [Zitat vom: 25. 7 2013.]
<http://www.caer.uky.edu/electrochemical/research/research.shtml>.

151. **JSR Micro**. JM Energy's Lithium Ion Capacitor: The Hybrid Energy Storage Advantage. [Online] 26. 2 2009. [Zitat vom: 20. 11 2013.]
http://www.avsusergroups.org/tfug_pdfs/2009_2banas.pdf.
152. **Cadex**. Charging Lithium-ion. [Online] [Zitat vom: 21. 8 2013.]
http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries.
153. **Sivakkumar, S.R. und Ruiz, V., Pandolfo, A.G.** ASSEMBLY AND TESTING OF LITHIUM-ION. [Online] 27. 9 2011. [Zitat vom: 20. 11 2013.]
http://acs.omnibooksonline.com/data/papers/2010_155.pdf.
154. **Tesla Motors Inc.** Forum. *Are we running the batteries at higher C-rates when the battery is discharging ?* [Online] 9. 6 2011. [Zitat vom: 22. 8 2013.]
<http://www.teslamotors.com/forum/forums/are-we-running-batteries-higher-crates-when-battery-discharging>.
155. **Moorthi, MuMu (Nei Corporation)**. Lithium Titanate Based Batteries for High Rate and High Cycle Life Applications; Neicorporation. [Online] 5. 5 2010. [Zitat vom: 25. 7 2013.]
http://neicorporation.com/white-papers/NEI_White_Paper_LTO.pdf.
156. **Kariatsumari, Kouji (Nikkei Electronics)**. High-performance Li-ion Capacitor Developed With CNT, Lithium Titanate. [Online] 15. 4 2010. [Zitat vom: 25. 7 2013.]
http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20100415/181879/.
157. **Miller, John**. Ultracapacitors. s.l. : Taylor & Francis Group, LLC, 2005.
158. **Rajashekara, Kaushik**. IEE Transportation Electrification. [Online] [Zitat vom: 18. 11 2013.] <http://electricvehicle.ieee.org/2013/09/29/trends-electric-propulsion/>.
159. **Maxwell Technologies**. Datasheet K2 series 650F - 3,000F Ultracapacitors, 2010-04-20. [Online] 20. 4 2010. [Zitat vom: 18. 11 2013.]
http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/datasheet_k2_series_1015370.pdf.
160. *SmartBatt – "Smart and Safe integration of batteries into electric vehicles" an EU-funded project*. **Kapeller, Hansjörg**. 2013.
161. **Volvo Bus Corpotation**. Volvo 7900 Hybrid. [Online] 4. 7 2011. [Zitat vom: 20. 11 2013.]
http://www.volvobuses.com/SiteCollectionDocuments/VBC/Global%20-%20ILF/Downloads/7900/Data%20sheet%207900_Hybrid_euro5.pdf.
162. **Erdinc, O., Vural, B. und Uzunoglu, M.** A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading. *IEEE*. 2009.
163. **Chen, Min**. Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*. 21, 2006, 2.
164. **Advanced Technology Group, Project Engg-Mech**. *Fuel Cells technology Scan*. 2008.
165. **IBT Group**. BUSES @ ZERO-EMISSIONS. *The First Innovative Hybrid Engine Turbine in Italy*. [Online] 29. 4 2011. [Zitat vom: 21. 8 2013.]
<http://www.ibtgroup.it/download/pdf/en/heveng.pdf>.
166. **Packard, Steve**. Depleted Cranium The Bad Science Blog. *Gas Turbines in Cars: The seemingly promising engine that never was*. [Online] 14. 8 2014. [Zitat vom: 2014. 11 29.]
<http://depletedcranium.com/gas-turbines-in-cars-the-seemingly-promising-engine-that-never-was/>.
167. **Dembinski, Henrik und Levis, Clive**. *Miller-cycle on a heavy duty diesel engine*. Stockholm : KTH Industrial Engineering and Management, 2009.

168. **Schutting, Eberhard, et al., et al.** Miller- und Atkinson-Zyklus am aufgeladenen Dieselmotor. *MTZ*. 2007, 6.
169. **ZF Friedrichshafen AG.** ZF Elektroportalachse AVE 130, Die ZF Antriebslösung für serielle Hybrid -konzepte. Und mehr. [Online] 17. 1 2012. [Zitat vom: 25. 7 2013.] http://www.zf.com/media/media/de/document/corporate_2/downloads_1/flyer_and_brochures/bus_driveline_technology_flyer/Hybridachse_AVE_130_D_08.pdf.
170. **Neudorfer, Harald.** Vergleich unterschiedlicher Antriebsmaschinen im Traktionsbereich. *Innovative Elektrische Antriebe - erfolgreich durch Intelligenz und Effizienz, Vortrag*. Wien : s.n., 2008.
171. **Aschenbrenner et. al (Institut für Elektrotechnik, Monanuniversität Leoben).** *Drehstromantriebe für Elektrokleinfahrzeuge. Endbericht*. Leoben : s.n., 2005.
172. **Aschenbrenner, Franz, Drögsler, Oswald und Thaler, Alexander.** Drehstromantriebe für Elektrokleinfahrzeuge. [Online] 2005. [Zitat vom: 25. 11 2013.] http://www.noest.or.at/intern/dokumente/009_Endbericht_Drehstromantriebe.pdf.
173. **Toyota Motor Corporation.** Hybrid Vehicle Dismantling Manual Lexus RX450h. [Online] 19. 6 2009. [Zitat vom: 25. 7 2013.] <http://www.lexus-tech.eu/HYBRID/HVDM/EN/RX450h%20HVDM.pdf>.
174. **Leroy Somer Marbaise.** Dyneo - Energiesparen. [Online] Leroy Somer Marbaise GmbH . [Zitat vom: 25. 7 2013.] <http://dyneo.leroy-somer.com/de/>.
175. **Comfort, Allen.** *An Introduction to Heavy-Duty Diesel Engine Frictional Losses* . s.l. : SAE, 2003. 2003-01-3225.
176. *Powertrain Materials and Fuel Efficiency.* **Rogers, G. (FEV Engine Technology Inc.).** [Hrsg.] National Academy of Sciences. Washington D.C. : s.n., 2002. in Commercial Vehicles Materials and Society: From Research to Manufacturing.
177. **Gulia N., Kovchegin S.,(Machine Design Department Moscow State Industrial University) Martin F. (Ikarus Budapest), Yurkov S. (ZIL).** New adaptive variator for automobile automatic stepless transmission and its experimental characteristics. . [Online] 2002. [Zitat vom: 26. 7 2013.] <http://www.n-t.ru/tpe/ts/av.htm>.
178. **AB Volvo.** Volvo Getriebe 6AP1400B/1700B/2000B. [Online] 22. 8 2012. [Zitat vom: 26. 7 2013.] <http://www.volvobuses.com/SiteCollectionDocuments/VBC/Downloads/Volvo-Factsheet-6AP1400B-DE.pdf>.
179. **Burress, Timothy Adam.** *Vector Control and Experimental Evaluation of Permanent Magnet Synchronous Motors for HEFs, Dissertation University of Tennessee*. Knoxville : s.n., 2006.
180. **Olszewsky, Mitch (Oak Ridge National Laboratory).** *Evaluation of 2005 Honda Accord Hybrid Electric Drive System*. Washington : U.S. Department of Energy, Freedom CAR and Vehicle Technologies, 2006.
181. *Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM). Parameters influence on the synchronization process of a PMSM.* **Rais, J. und Donsion, M.P.** 2008.
182. *Design and Control of an Hybrid Transmission with Electrical Power Splitting.* **Hofmann, W. und Tenberge, P. (University of Technology Chemnitz)**. Lausanne : s.n., 1999. EPE'99.
183. **Yadlapalli, Naveen.** *Implementation Of A Novel Soft-Switching Inverter For Switched Reluctance Motor Drives, Thesis*. Blacksburg : Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.
184. **Minav T., et. al.** Storage of energy recovered from an industrial forklift. *Automation in Construction Vol. 22*. 2012.

185. *Electric Machine Design Tailored for Powertrain Optimization*. **Gerling, Dieter, Dajaku, Gurakuq und Mühlbauer, Klaus**. Shenzhen : EVS 25, 2010.
186. **IEC**. Rotating electrical machines – Part 1 Rating and performance. 2004. IEC 60034-1:2004(E).
187. **Papalias, Tamara und Wong, Mike (Intersil)**. A Novel Approach to Creating a High-Efficiency, Simple Buck-Boost Converter. [Online] 8. 5 20065. [Zitat vom: 26. 7 2013.] <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/an12/an1254.pdf#search=%22losses%20buck%20boost%20converter%22>.
188. **Waffler, S. und Kolar, J.W. (Power Electronic Systems Laboratory ETH Zürich)**. A Novel Low-Loss Modulation Strategy for High-Power Bi-directional Buck+Boost Converters. [Online] 6. 9 2007. [Zitat vom: 26. 7 2013.] http://www.pes.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/waffler_ICPE07_01.pdf.
189. **Chong-Eun, Kim und et.al. (Dept. of Electrical Engineering, KAIST Daejeon Korea)**. A New High Efficiency ZVZCS Bidirectional DC/DC Converter for HEF 42V Power Systems. *Journal of Power Electronics, Vol. 6. 3. 7 2006*.
190. **Kerschenbauer, Peter**. *Widerstandsbestimmung von metallischen Proben mit der Vier-Punkt-Methode; Diplomarbeit*. Graz : Technische Universität Graz, 2008.
191. **Coroplast Fritz Müller GmbH & Co. KG**. Sonderleitungen für Elektrofahrzeuge. [Online] 4. 10 2011. [Zitat vom: 26. 7 2013.] http://www.coroplast.de/uploads/tx_shtcorodownloads/CP_Brosch_e_Mobility_D.pdf.
192. **Simpson, A.G. und Walker, G.R. (The University of Queensland School of Computer Science and Electrical Engineering)**. Simulated lifecycle costs of ultracapacitors for battery electric vehicles. [Online] 8. 6 2002. [Zitat vom: 26. 7 2013.] http://itee.uq.edu.au/~walkerg/publications/2002/ultracaps_in_EVs_02.pdf.
193. **Kötza, R., Hahna, M. und Gallyb, R**. Temperature behavior and impedance fundamentals of supercapacitors. *Journal of Power Sources; Volume 154. 3 2006*, S. 550-555.
194. **Instruments), Kasey (Gamry**. Testing Electrochemical Capacitors Part 2 – Cyclic Charge Discharge and Stacks;. [Online] 29. 3 2012. [Zitat vom: 26. 7 2013.] <http://www.gamry.com/assets/Application-Notes/Testing-Super-Capacitors-Pt2.pdf>.
195. **Maxwell Technologies**. Gateway to a New Thinking in Energy Management – Ultracapacitors. [Online] 10. 5 2006. [Zitat vom: 26. 7 2013.] http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/switchgear/presentations/Maxwell_Switchgear_Galveston.pdf.
196. **Kötza, R., et. al. (Paul Scherrer Institut, Electrochemistry Laboratory, Villigen und Switzerland), in**. Voltage balancing: Long-term experience with the 250 V supercapacitor module of the hybrid fuel cell vehicle HY-LIGHT . *Journal of Power Sources Volume 174*.
197. *Update of Ultracapacitor Technology and Hybrid Vehicle Applications: Passenger Cars and Transit Buses*. **Burke, A. und Miller, M. (University of California)**. Berlin : s.n., 2001. EVS18.
198. **Taian Taishan New Power Electrical Machinery**. Data Sheets 0.5-30kw dc brushless motor for e-vehicle . [Online] [Zitat vom: 4. 2 2013.] <http://factory.dhgate.com/auto-motor/0.5-30kw-dc-brushless-motor-for-e-vehicle-p43236797.html> .
199. *Efficiency of Nonstandard and High Gear Contact Ratio Involute Spur Gears, Nasa Technical Memorandum 83725*. **Anderson, Neil; Loewenthal, Stuart (AVSCOM Research and Technology Laboratories)** . Cambridge Massachusetts : NASA, 1984. Fourth International Power Transmission and Gearing Conference.

200. **Jaster, Tiffany.** *Modeling and Simulation of a Hybrid Electric Vessel.* Victoria : University of Victoria, 2006.
201. **Amtmann, Gerhard (Graz Linien).** Elektromobilität Road Map – Neue Mobilität in der Steiermark - Aktuelle Entwicklungen, Perspektiven und Implementierungsszenarien für Elektrofahrzeuge. [Vortrag]. Graz : s.n., 10. 3 2011.
202. **boshart consulting.** Sensitivitätsanalyse. [Online] 18. 3 2012. [Zitat vom: 26. 7 2013.] http://www.bosshart-consulting.ch/downloads/de/Papiercomputer_Beschreibung.pdf.
203. **Busse, Mathias.** NMEA 0183 Datensätze. [Online] [Zitat vom: 26. 7 2013.] <http://www.nmea.de/nmea0183datensaetze.html>.
204. **Cebrat, Gerfried (FGM).** *Projektbericht Evaluierung von Positionierungstechnologien für das Monitoring von Gefahrguttransporten auf dem hochrangigen österreichischen Straßennetz.* Graz : ARTIST Programm bm:vit, 2004.
205. **Movable Type Scripts.** Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points. [Online] 7. 10 2012. [Zitat vom: 26. 7 2013.] <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>.
206. **openstreetmap.** Öffentliche GPS-Tracks. [Online] [Zitat vom: 26. 8 2013.] <http://www.openstreetmap.org/traces>.
207. **Leica Geosystems AG.** GPS Basics; Einführung in die GPS-Vermessung Version 1.0. [Online] 15. 5 2002. [Zitat vom: 26. 7 2013.] <http://cms.uni-kassel.de/unicms/uploads/media/GPS-Basics.pdf>.
208. **Zlocki, Adrian (ika RWTH Aachen).** Vorausschauendes Energiemanagement für innovative Hybrid-Antriebe. [Online] 3. 8 2010. [Zitat vom: 26. 7 2013.] http://www.ika.rwth-aachen.de/pdf_eb/gb6-29_energiemanagement_hybrid.pdf.
209. *Möglichkeiten und Grenzen moderner Digitalfunk-Systeme.* **Weisskopf, Andreas (Weisskopf Engineering AG).** Berlin : s.n., 2007 (2009). Digitalfunksysteme Betriebsleiterforum.
210. **Djuknic, Goran M. und Richton, Robert E.** *Geolocation and Assisted GPS.* 2001.
211. **Lardinois, Frederic.** Google Maps Gets Smarter: Crowdsources Live Traffic Data. [Online] 25. 8 2009. [Zitat vom: 26. 7 2013.] http://readwrite.com/2009/08/25/google_maps_gets_smarter_crowdsources_traffic_data.
212. *Energy Management and Drivability Control Problems for Hybrid Electric Vehicles.* **Pisu, Pierluigi, Koprubasi, Kerem und Rizzoni, Giorgio.** Sevilla : Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, 2005.
213. **Hellström, Eric.** *Look-ahead Control of Heavy Trucks utilizing Road Topography.* Linköping : s.n., 2007.
214. **Popov, Mikhail.** Globale Optimierung mit Simulated Annealing. *Proseminar über Algorithmen – SS2008.* [Online] 26. 6 2008. [Zitat vom: 25. 8 2013.] <http://page.mi.fu-berlin.de/brittadb/lehre/proseminar08/simulatedannealing.pdf>.
215. **Theis, Christian und Kernbichler, Winfried.** Grundlagen der Monte-Carlo Methoden. [Online] 15. 5 2002. [Zitat vom: 2. 8 2013.] <http://itp.tugraz.at/MML/MonteCarlo/MCIntro.pdf>.
216. **Faming, Liang; Wing Hung, Wong (The National University of Singapore and UCLA).** Evolutionary Monte-Carlo: applications to cp model sampling and change point problem. *Statistica Sinica*10. 2000, S. 317-342.
217. **Back, Michael.** *Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen.* Karlsruhe : Universitätsverlag Karlsruhe, 2006.

218. **ETH Zürich - Research Guzzella.** AHEAD - Advanced Hybrid Electric Autobus Design. [Online] [Zitat vom: 2. 8 2013.] http://www.idsc.ethz.ch/Research_Guzzella/Automotive_Applications/Hybrid_Powertrains/AHEAD.
219. **Weber, Mino (Dresdener Verkehrsbetriebe AG).** Weber M.; Wirtschaftlichkeit von Hybridbussen. [Online] 18. 5 2011. [Zitat vom: 2. 8 2013.] <http://www.pt-elektromobilitaet.de/events/pdf-dateien/wirtschaftlichkeit-von-hybridbussen>.
220. **MAN Truck & Bus.** Die Zukunft fährt grün - Der neue MAN Lion's City Hybrid. [Online] [Zitat vom: 28. 8 2013.] http://www.mantruckandbus.com/com/de/produkte__l_sungen/aktuelle_themen/lion_s_city_hybrid/Lion_s_City_Hybrid.html.
221. **Hemmingsson, Morten.** *A Powerflow Control Strategy to Minimize Energy Losses in Hybrid Electric Vehicles.* Lund : Universitetsstryckeriet, Lund University, 1999.
222. **NREL National Renewable Energy Laboratory U.S.A.** Elektronische Dokumentation Series Control Strategy Advisor. [Online] NREL, 2004. [Zitat vom: 2. 8 2013.] </documentation/Series.htm>.
223. *Regenerative Braking for an Electric Vehicle Using Ultracapacitors and Buck-Boost Converter, Dep. of Electrical Engineering.* **Dixon, Juan W. ; Ortúzar, Micah ; Wiechmann, Eduardo (Catholic University of Chile).** Montreal, Kanada : s.n., 2000. EVS-17.
224. **McBrown, Scott (Southwest Research Institute Advanced Vehicle Technology section, Vehicle and Driveline Research Department).** Vehicle Modelling and Simulation. [Online] 2001. <http://www.rt-lab.com/files/vehiclesimulation.pdf>.
225. *Advances in Real-Time Simulation of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles.* **Dufour, Christian, et al., et al.** Monte Carlo : s.n., 2005. Proceedings of the 21st Electric Vehicle Symposium (EVS-21).
226. **Katzgraber, Helmut (ETH Zürich).** Exchange Monte Carlo: An efficient workhorse for optimization problems. Zürich : s.n., 2. 4 2008.
227. **Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.** Ergebnisbericht 2011 der Modellregionen Elektromobilität. [Online] 31. 1 2012. [Zitat vom: 2. 8 2013.] http://www.pe-international.com/fileadmin/Resources/Studies_german/Zusammenfassung_Ergebnisbericht_Busplattform.pdf.
228. **Pallavkar, Sameer, et al., et al.** Active Regeneration of Diesel Particulate Filter Employing Microwave Heating. [Online] 11. 10 2008. [Zitat vom: 10. 12 2013.] <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie800780g>.
229. *European Bus System of the future - On the way to an integrated approach on nformation technologies and telematics .* **Guida, Umberto.** Dresden : Polis UITP, 2010.
230. **Allen, Mark.** Network Broadcasting and Multicasting. [Online] [Zitat vom: 30. 3 2014.] <http://www.comptechdoc.org/independent/networking/guide/netbroadcasting.html>.
231. **Jesty, P., et al., et al.** *DSA3.1 System Architecture: Architecture Assessment Guidelines; CONVERGE Transport Telematics Support & Consensus.* 1996.
232. **Gruber, Matthias.** *Modulare Delta Algorithmen für das praktische.* Innsbruck : Universität für Gesundheitswissenschaften, Medizinische Informatik und Technik in Hall in Tirol, 2007.
233. **Milikin, M.** Green Car Congress. *Ricardo study finds retrofitted Euro III bus can emit less NOx than newer Euro V hybrid.* [Online] 28. 11 2014. [Zitat vom: 28. 11 2014.] <http://www.greencarcongress.com/2014/11/20141128-ricardo.html>.

234. **Haoshen, Zhou (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology).** Electrode Made from Mesoporous Nanocomposite Materials to Upgrade Power Density of Lithium Rechargeable Battery by Two Orders of Magnitude or More. [Online] ANST, 18. 1 2005. [Zitat vom: 25. 7 2013.]
http://www.aist.go.jp/aist_e/latest_research/2005/20050203/20050203.html.
235. **Redox Engineering LLC.** Batteries & Energy Storage Technology. *The supercap communication challenge*. s.l. : supercapseminar, 2005, S. 107ff.
236. **MAN Nutzfahrzeuge AG.** red dot design award für NEOPLAN Skyliner. [Online] [Zitat vom: 4. 2 2013.]
http://www.mantruckandbus.com/com/de/press__media/Pressemitteilung_129984.html.
237. **Olszewski, Mitch (Oak Ridge National Laboratory).** *Evaluation of the 2007 Toyota Camry Hybrid Synergy Drive System*. Washington : U.S. Department of Energy, FreedomCAR and Vehicle Technologies, 2008.
238. **U.S. Department of Energy.** Fact #607: Energy and Power by Battery Type. [Online] EERE, 25. 1 2010. [Zitat vom: 25. 7 2013.]
http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/facts/2010_fotw607.html.
239. **Burres, Timothy Adam.** *Vector Control and Experimental Evaluation of Permanent Magnet Synchronous Motors for HEVs*, Dissertation University of Tennessee,, Knoxville : s.n., 2006.
240. **Sartorelli, G.A (Maxwell Technologies).** EDLC: State of the Art and Trend. Stuttgart, ElectroGraph : s.n., 2012.
241. **Zaihar, Nor und Jumanazarov, Ahmet.** A Comparative Study of Switching Loss in IGBT and CoolMos Power Switch Devices. [Online] 8. 4 2005. [Zitat vom: 26. 7 2013.]
http://www.ecti-thailand.org/assets/papers/266_pub_24.pdf.
242. **Ashley, Steven.** Study says lithium-ion batteries should rule for the next decade at least. [Online] 25. 4 2013. [Zitat vom: 21. 8 2013.] <http://www.sae.org/mags/aei/12010/>.
243. **Bella, Espinar und Mayer, Didier.** *The role of energy storage for mini-grid stabilization (Report IEA-PVPS T11-02:2011)*. Paris : IEA, 2011.

14.4 ABBILDUNGEN

Abbildung 1: Überblick Motorleistungen seriell-hybrider Busse für Verbrennungskraftmaschine im Motor-Generator-Satz und Elektroantrieb (eigene Zusammenstellung aus mehreren Quellen (47) (48) (49) (50) (51) (52) (53) (54)).....	13
Abbildung 2: Leistungsflüsse serieller Hybridantrieb mit Zentralantrieb und Getriebe.....	15
Abbildung 3: Leistungsflüsse Hybridantriebskonzept mit Leistungsverzweigung.....	16
Abbildung 4: Hybridantriebskonzept mit Leistungsverteilung im Planetenradgetriebe (<i>Toyota Hybrid Synergy Drive</i>).....	17
Abbildung 5: Parallel-hybrides Antriebskonzept mit Doppel Planetenradsystem AHS-2 (77).....	18
Abbildung 6: Vergleich Rollwiderstandsbeiwert für verschiedene Reifenquerschnitte in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Daten (92) extrapoliert.....	20
Abbildung 7: Blockdiagramm für die Simulation des Antriebssystems.....	24
Abbildung 8: Absolute Häufigkeit (mit der Summe der Zeit des Auftretens) der Geschwindigkeit bei den mittels GPS aufgezeichneten (gültigen) drei Fahrten vom 29.6, 30.6 und 19.7.2006.....	27
Abbildung 9: Sensibilitätsanalyse Energiebedarf für den Fahrwiderstand für den aufgezeichneten Linienabschnitt Fahrt 0 vom 29.6. 2006 Linie 67.....	29
Abbildung 10: Anteile Fahrwiderstände am Energiebedarf: statistische Auswertung aller in der Simulation benutzen Fahrkurven.....	32
Abbildung 11 Darstellung der Effekte in Doppelschicht Kondensatoren (142).....	36
Abbildung 12: Anwendungsbezogener Vergleich EDLC-Lithium-Polymer Sekundärzellen mit unterschiedlicher Auslegung, eigene Berechnung, Basisdaten Li-Ionen Zelle aus (155), Innenwiderstand EDLC 0,025 Ohm.....	39
Abbildung 13: Ungefähre Aufteilung der mechanischen Verluste im Dieselmotor (167).....	42
Abbildung 14: Vorgehensweise bei der Datengewinnung für die Optimierung des Betriebspunktes des Motor-Generator-Satzes aus einer graphischen Darstellung von Messdaten (Kontur-Plot mit eingezeichneten Datenlabels).	44
Abbildung 15: kombinierter Wirkungsgrad Elektromotor und Leistungselektronik, eingefärbtes Original und Ergebnis der Auswertung.....	45
Abbildung 16: Beispiel für das Ergebnis der Vorberechnung der Wirkungsgrade des Antriebs auf Basis der aus den GPS Daten ermittelten relativen Leistung (rechte y-Achse) und Drehzahl.....	46
Abbildung 17 Arbeitspunkte im Kennfeld der Antriebsmaschine für Fahrt 1 (ohne Erhöhung der Nennleistung).....	46
Abbildung 18: Spannungsabhängige Effizienz Hochsetz-Tiefsetz-Steller (über Bildverarbeitung aus dem Kontourdiagramm (176) abgelesen und interpoliert).....	48
Abbildung 19: Stromabhängige Verluste bei der Spannungsanpassung im Hochsetz-Tiefsetz-Steller in Abhängigkeit von der normierten Leistung (177).....	49
Abbildung 20: spezifischer Verbrauch Dieselmotor in Abhängigkeit von relativer Drehzahl und relativer Leistung.....	52
Abbildung 21: Ergebnisse der Dynamikkorrektur Motor-Generator-Satz gemäß Formel 21 aus (101).....	54
Abbildung 22: Sankey-Diagramm aus der Simulation des seriell-hybridelektrischen Antriebssystems.....	56
Abbildung 23: Überlagerungsvarianten von Verbrauchskurven VKM und Effizienzkurven Generator.....	59

Abbildung 24: Verbrauch bei 1:1 Überlagerung der Verbrauchskurve der VKM mit der Wirkungsgradkurve des Generators.....	60
Abbildung 25: Masse-Leistungs-Verhältnis stationäre Elektromotoren, dargestellt über die Nenndrehzahl (186)	62
Abbildung 26: Veränderungen der Generatormasse durch Getriebe (Zerrung der Drehzahl) und Variation des Leistungsverhältnisse zwischen VKM und Generator nach Formel 24.....	63
Abbildung 27: Annahmen Getriebemasse und Transmissionswirkungsgrad, abhängig von der Übersetzung (187).....	63
Abbildung 28: Mehrverbrauch des Motor-Generator-Satzes zum Bestpunkt in g / kWh bei Variation des Drehzahl und Nennleistungs- Verhältnisses zwischen VKM und Generator mit Pönalisierung des Getriebes	64
Abbildung 29: Optimale relative Drehzahl und Verbräuche pro im Generator erzeugter elektrischer kWh in Abhängigkeit von der Last in Prozent.....	65
Abbildung 30: Optimale Drehzahl Motor-Generator-Satz in Abhängigkeit von elektrischer Leistung und EDLC-Spannung.....	66
Abbildung 31: Spezifischer Verbrauch Motor-Generator-Satz in Abhängigkeit von EDLC-Spannung und elektrischer Leistung.....	67
Abbildung 32: Berechnungsablauf Simulation - Datenflüsse und Datenspeicher.....	69
Abbildung 33: Wechselwirkung der Speichergröße und Auslegungsdaten Motor-Generator-Satz auf Verbrauch (<i>Consideo</i> -Modeller)	74
Abbildung 34: Auswirkungen der Variation der Nennleistung des Motor-Generator-Satzes	75
Abbildung 35: Kraftstoffverbrauch und Laufzeit abhängig von der Leistung des Motor-Generator-Satzes.....	76
Abbildung 36: Konsequenzen der Veränderung des Energieinhaltes des Energiespeichers (konstante Schaltgrenzen der Hystereseregulung)	77
Abbildung 37: Kraftstoffverbrauch und Anzahl Starts Motor-Generator-Satz abhängig vom normierten Energieinhalt des EDLC	78
Abbildung 38: GPS-Spur der aufgezeichneten Fahrten und Darstellung einer ausgewählten Fahrt in OpenStreetMap (194)	80
Abbildung 39: Fahrzyklen und Maximalgeschwindigkeiten in den Segmenten zwischen potentiellen Zwangshalten (alle Typen)- Auswertung dreier aufgezeichneter Fahrten	81
Abbildung 40: Genauigkeit der auf GPS-Geschwindigkeiten basierenden odometrischen Ermittlung der Abstände zur Position der potentiellen Zwangshalte	84
Abbildung 41: Vorschlag Systemarchitektur für eine zukünftige Datenversorgungsmöglichkeit zur genaueren Definition potentieller Zwangshalte für die taktische HEF-Regelung (grün=empfohlen)	86
Abbildung 42: Optimierungsansätze nach Datenverfügbarkeit und Analyseverfahren (Darstellung in <i>XMind</i>).....	90
Abbildung 43: Implementierungsprinzip für die prädiktive taktische Regelung mit Nutzung von Zustandsgrößen und Abständen zu potenziellen Zwangshalten	93
Abbildung 44: Entscheidungslogik Hystereseregulung für den Einsatz des Motor-Generator-Satzes in der Simulation.....	94
Abbildung 45: Ansatz für die Beeinflussung der SOC-Grenzen bei der Hystereseregulung Δ SOC kann je nach Einflussmodell positiv oder negativ sein	95
Abbildung 46: Einfluss der SOC-Grenzen auf den Verbrauch (<i>Consideo</i> Modeller)	96
Abbildung 47: Visualisierung der Alternativen bei der Modifikation der SOC-Grenzen für die Hysterese-Regelung, Variation des Korrekturfaktors des Einflusses des Abstandes zum potentiellen Zwangshalt auf den SOC von - 1,0 bis + 1,0	101

Abbildung 48 Zusammenführung der Einflüsse nach Formel 29 und Formel 30 zu einem heuristischen Algorithmus für die SOC-Korrektur beim strategischen Energiemanagement. ...	102
Abbildung 49: Kraftstoffverbrauchssumme bei Variation des Faktors für den Einfluss der Laufzeit des Motor-Generator-Satzes auf die Modulation des SOC_{max}	106
Abbildung 50 SOC-Grenzen bei Variation des Faktors für den Einfluss der Laufzeit des Motor-Generator-Satzes auf die Modulation des SOC_{max}	107
Abbildung 51: Kraftstoffverbrauch bei Variation des Faktors für den Einfluss der Laufzeit des Motor-Generator-Satzes auf die Korrektur des SOC_{min}	108
Abbildung 52 SOC-Grenzen bei Variation des Faktors für den Einfluss der Laufzeit des Motor-Generator-Satzes auf die Modulation des SOC_{min}	108
Abbildung 53: Kraftstoffverbrauchssumme bei Variation des Faktors für den Einfluss der Spannungsdifferenz zwischen EDLC-Generator auf die Modulation des SOC_{max}	109
Abbildung 54 SOC-Grenzen bei Variation des Faktors für den Einfluss der Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Generator auf die Modulation des SOC_{max}	110
Abbildung 55: Kraftstoffverbrauchssumme bei Variation des Faktors für den Einfluss der Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Generator auf die Modulation des SOC_{min}	110
Abbildung 56 SOC-Grenzen bei Variation des Faktors für den Einfluss der Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Generator auf die Modulation des SOC_{min}	111
Abbildung 57: Kraftstoffverbrauchssumme und Faktor für den Einfluss der elektrischen Nettoleistung vom/zum EDLC auf die Modulation des SOC_{max}	112
Abbildung 58 Veränderung der SOC bei Variation des Faktors für den Einfluss der elektrischen Nettoleistung zum EDLC auf die Modulation des SOC_{max}	112
Abbildung 59: Kraftstoffverbrauch bei Variation des Faktors für den Einfluss der elektrischen Nettoleistung zum EDLC auf die Modulation des SOC_{min}	113
Abbildung 60: SOC-Grenzen bei Variation des Faktors für den Einfluss der elektrischen Nettoleistung zum EDLC auf die Modulation des SOC_{min}	113
Abbildung 61: Kraftstoffverbrauchssumme bei Variation des Faktors für den Einfluss des SOC auf die Modulation des SOC_{max}	114
Abbildung 62 Veränderung der SOC bei Variation des Faktors für den Einfluss des SOC auf die Modulation des SOC_{max}	115
Abbildung 63: Kraftstoffverbrauchssumme bei Variation des Faktors für den Einfluss des SOC auf die Korrektur des SOC_{min}	115
Abbildung 64 Veränderung der SOC-Grenzen bei Variation des Faktors für den Einfluss des SOC auf die Modulation des SOC_{min}	116
Abbildung 65: Optima und Perzentilswerte P10 und P20 der Verbrauchssummen für die faktorisierten 4 Einflüsse der Zustandsfaktoren bei variabler Busmasse mit 100.000 gerechneten Varianten.....	117
Abbildung 66: Verbrauchssumme für 9 Fahrten bei Variation von Faktoren für zwei Einflüsse.....	119
Abbildung 67: Heuristischer Ansatz für die Implementierung der Untersuchungen auf Basis der <i>Monte-Carlo</i> Simulation.....	121
Abbildung 68: Ergebnisse der MC-Variation (100.000 Varianten berechnet, variable Busmasse).....	123
Abbildung 68: Beispielhafte graphische Darstellung der besten gültigen Ergebnisse der MC-Variation bei von 1000 auf 100.000 zunehmender Zahl der untersuchten Lösungen, markiertes Optimum, variable Busmasse.....	124
Abbildung 69: Verbrauchsminimum MC-Variation bei steigender Stichprobengröße (variable Busmasse).....	125

Abbildung 70: Darstellung der besten 500 Varianten für Gleich und Standardverteilung der Faktoren für den Einfluss der Zustandsgrößen	125
Abbildung 71: Statistische Auswertung der 25 besten Lösungen für die Variation der ersten 8 Einflussfaktoren (für eine Auflistung aller Faktoren siehe Kap. 14.1 Einflussfaktoren).	126
Abbildung 73: Beispiel Ergebnis der Modellierung variabler Besetzungsgrad während der Fahrt	127
Abbildung 73: Auswirkung der Variation des Besetzungsgrades während der Fahrt auf die Antriebsenergie	127
Abbildung 75: Vergleich der Ergebnisse der MC-Simulation, 150.000 Varianten mit und ohne Abstandseinfluss, beziehungsweise mit und ohne Einfluss der Zustandsgrößen, mit Begrenzung auf max. 120 Starts	128
Abbildung 76: Sortierte Ergebnisse der MC-Variation mit Summe der Verbräuche für Varianten mit und ohne Einfluss des Abstandes beziehungsweise der Einfluss der Zustandsfaktoren	129
Abbildung 77: Korrelation der Ergebnisse für eine Teilmenge von 5 Fahrten mit den Ergebnissen für alle neun Fahrten und denselben Faktorensätzen für 101 von 100.000 Variationen	130
Abbildung 78: Darstellung des Verlaufs von SOC- und Motor-Generator-Satz-Einsatz über die Zeit für Hysterese und modulierende Regelung des Motor-Generator-Satzes	131
Abbildung 79: Korrelation Verbrauchssummen-Varianz der Verbräuche für die unterschiedlichen Fahrten 200.000 Varianten, variable Masse.....	133
Abbildung 80: Korrelation Kraftstoffverbrauch und Energiebilanz Speicher vor- und nach der Fahrt, gemeinsam und getrennt für die Fahrten, konstante Masse	133
Abbildung 81: Verlauf der GPS-Werte für die horizontalen Abweichungen (HDOP) und für die Höhe für eine Messfahrt über die Zeit.....	135
Abbildung 82: Darstellung der berechneten „realen“ und theoretischen kumulierten Abstände zu den Zwangshalten und der Geschwindigkeit des Fahrzeuges zum Vergleich.....	136
Abbildung 83: Verbrauch bei der variablen Verschiebung hin zu den potentiellen Zwangshalten, fixe Busmasse	137
Abbildung 84 Gereichte Ergebnisse für unterschiedliche Modulationsverfahren bei Variation des Energiebedarfs für Nebenaggregate in Prozent der elektrischen Generatorkennleistung.	138
Abbildung 84: Darstellung der Summe der Verbräuche über die Gesamtsumme der Starts, variable Busmasse, 100.00 Varianten	139
Abbildung 85: Motor-Generator-Satz Einsatz im Vergleich zum Leistungsbedarf des Antriebes bei hoher Zahl von Starts des Motor-Generator-Satzes.....	139
Abbildung 86 Boxplot mit Darstellung der Minima, Maxima und der mittleren zwei Quartile, sowie der Mediane der erzielten Einsparungen gegenüber der Nullvariante für variable Busmasse.....	140
Abbildung 88 Korrelation der Verbrauchssumme mit den Einflussfaktoren für 100.000 gerechnete Varianten und variable Busmasse.....	144
Abbildung 89 Darstellung der Verbrauchssumme in Abhängigkeit von mittlerem absolutem Energieinhalt SOC und der mittleren Spannungsdifferenz zwischen EDLC und Motor-Generator-Satzes	145
Abbildung 90 Vergleich der mittleren Einflussparameter für die zehn besten Lösungen	146
Abbildung 91 Preise für EDLC-Zellen und Module	147
Abbildung 92 Verteilung der Ergebnisse für die Verbrauchssummen bei unterschiedlichen Energieinhalten der EDLC als Ergebnis der erweiterten Monte Carlo Variation 75.000 MC Varianten für je 100 EDLC Größen	148
Abbildung 93 Ergebnisstatistik bei der Variation des Energieinhaltes des EDLC, 75.000 MC Varianten für je 100 EDLC Größen, variable Busmasse.....	149

Abbildung 94 Vergleich der Varianten des taktischen Energiemanagements für verschiedene EDLC Energieinhalte (unterschiedliche Zahl von Lösungen)	150
Abbildung 95: Korrelationen des Kraftstoffverbrauches mit den-Rohemissionen bei den Fahrten (Berechnungsergebnisse MC-Simulation)	151
Abbildung 96: Umsetzungsvorschlag des Telematik-basierten taktischen Energiemanagements in der Praxis	153
Abbildung 97 autarke umsetzbare Systemarchitektur mit zentraler Datenhaltung	155
Abbildung 98 Ablauf Datengewinnung und Datenversorgung Fahrzeuge	157
Abbildung 99: Kapital- oder Nettobarwert für die maximal zulässige Investitionskosten im Fahrzeug in Abhängigkeit von der Flottengröße und der Investitionshöhe für die zentrale Funktionalität	160
Abbildung 100: Mittelwerte der Verbrauchseinsparung bei der MC-Variation für verschiedene Kombinationen des Einflusses von Zustandsgrößen und Abstand zu potentiellen Zwangshalten bei der Modulation der Schaltgrenzen der Hystereseregulierung für variable Busmasse	162

14.5 TABELLEN

Tabelle 1: Vergleich berechnete Fahrzeugmassen zwischen konventionellem und Hybridantrieb	22
Tabelle 2: Grunddaten Antriebssystem für die Simulation – Annahmen für die Leistungen, das Drehmoment und die Berechnung der leistungsabhängigen Masse der Maschinen vgl. auch (94), (49), (106).....	26
Tabelle 3: mechanischer Energiebedarf bzw. Energieanfall bei konstanten Beschleunigungs- und Bremsvorgängen mit Berücksichtigung der geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstände	27
Tabelle 4: Grunddaten EDLC in der Simulation; Annahmen, tw. siehe (49)	28
Tabelle 5: generelle und spezielle Anforderungen an Energiespeicher in ÖPNV	34
Tabelle 6: Variantenvergleich der für den Energiespeicher erforderlichen Masse für die Zellen	38
Tabelle 7: Unterscheidung von Fällen für die Spannungsregelung im Fahrbetrieb	47
Tabelle 8: Pseudocode Simulation mit Dynamikkorrektur	53
Tabelle 9: typische Energieverluste in den Komponenten des seriell-hybriden Antriebssystems (vor der Korrektur infolge unterschiedlichen Energieinhalts vor und nach der Fahrt)	57
Tabelle 10: Bilanz des seriell-hybriden Antriebssystems	57
Tabelle 11: Einflusstabelle Optimierungsvarianten Abstimmung VKM und Generator	61
Tabelle 12: Pseudocode des Ablaufes in der Simulation	70
Tabelle 13: Kriterien für die Maximierung der rekuperierten Energie.....	73
Tabelle 14: Beispiel Aufzeichnung GPS-Rohdatensätze (BT338 SiRFstar III)	79
Tabelle 15: Kategorien für potentielle Zwangshalte	82
Tabelle 16: Datengewinnungsverfahren für den Abstand zu potentiellen Zwangshalten	83
Tabelle 17: Charakterisierung der Verfahren für das taktische Energiemanagement die potentielle Zwangshalte berücksichtigen	83
Tabelle 18: Anforderungen zur Gewinnung der Daten für die Prognose der zukünftigen Energieumsätze	85
Tabelle 19: Datenquellen für potentielle Zwangshalte im ÖPNV	86
Tabelle 20: Bewertung Datenversorgung im ÖPNV für die Entfernung zu potentiellen Zwangshalten.....	88
Tabelle 21: Benutzte äußere Einflüsse für die abstandsabhängige Modifikation der SOC-Grenzen	98

Tabelle 22: Benutzte innere Einflüsse für die zustandsabhängige Modifikation der SOC-Grenzen	99
Tabelle 23: Faktorierte Lösung für drei Variablen mit zwei Ebenen (Nähe und Ferne zum potentiellen Zwangshalt Variante a) nach Formel 30 grün, b) rot)	102
Tabelle 24: Erfolgreichste Varianten der Kombination der Einflüsse der Zustandsgrößen (Faktorisierungstabelle) bei variabler Masse, beste Lösungen sind grau hinterlegt	117
Tabelle 25: Optimale Kombination Faktorisierung bei getrennten Faktoren für den Einfluss auf SOC _{min} und SOC _{max} bei konstanter Busmasse 50.000 Varianten gerechnet	118
Tabelle 26: Beschreibung der Interquartilbereiche bei der Versuchsplanung zur MC-Variation	122
Tabelle 28: relative Standardabweichungen der Ergebnisse/Energieströme	132
Tabelle 29: Varianten der Bestimmung der Abstände zu den potentiellen Zwangshalten	134
Tabelle 30 Algorithmus für die Suche des der Position nächstgelegenen Punktes am Pfad der Fahrtroute	135
Tabelle 31: Vergleich der Pearsonsche Korrelationskoeffizienten für Zustandsgrößen mit der Verbrauchssumme für unterschiedliche Einfluss-Varianten	146
Tabelle 32: Gegenüberstellung Selbstlernendes System – Datenversorgung aus dem GIS	154
Tabelle 33: Algorithmus zur Gewichtung potentieller Zwangshalte	156
Tabelle 34: Verifizierung funktionale Systemarchitektur	158
Tabelle 35: Kostenansätze Wirtschaftlichkeitsberechnung (207)	159

14.6 FORMELN

Formel 1: Längsdynamik für die Fahrzeugsimulation	19
Formel 2: Berechnungsformel und Annahmen Luftwiderstand seriell hybrider Stadtbus für die Berechnung	19
Formel 3: Formel Rollwiderstand, Größengleichung und Faktoren zur Berechnung des Rollwiderstandsbeiwertes (93)	21
Formel 4: Formel Beschleunigungswiderstand	21
Formel 5: Berechnung der mittleren Leistung der VKM des Motor-Generator-Satzes aus der Bilanz für eine Fahrkurve	25
Formel 6: Berechnung maximale Antriebsleistung mit Beschleunigungskomponente	31
Formel 7: Berechnung mittlere Antriebsleistung mit Rekuperation und idealem Speicher	31
Formel 8: Berechnung nutzbare rekuperierte Bremsenergie	31
Formel 9: Berechnung der zum Start des Motor-Generatorsatzes erforderlichen Energie	32
Formel 10: Berechnung des Energieinhalts eines EDLC	36
Formel 11 maximaler Entladestrom Sekundärbatterie	37
Formel 12: Bemessung Energiespeicher abhängig von Leistungs- und Energiedichte	38
Formel 13: Umsetzung Wirkungsgradberechnung im Programm Motorgenerator	44
Formel 14: Berechnungsformel für die relative Drehzahl der elektrischen Antriebsmaschine in der Simulation	45
Formel 15: Formel zur Wichtung bei der Ermittlung von Ergebnissen zwischen Einzelwerten einer Matrix	48
Formel 16: Berechnung der Ohmschen Verluste Leistungsübertragung in Kabeln	49
Formel 17: Berechnung Verlustleistung durch Leckagestrom EDLC	50
Formel 18: Berechnung Spannung im EDLC	50
Formel 19: Berechnung Ohmsche Verluste EDLC	51

Formel 20: Berechnung Dynamikkorrektur Kraftstoffbedarf pro Fahrt	53
Formel 21: Berechnung Dynamikkorrektur nach dem ARTEMIS Modell der TU-Graz Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (101)	54
Formel 22: Berechnung relative Generatordrehzahl mit Getriebe	60
Formel 23: Formel Verbrauchskorrektur durch Annahme von Proportionalität der Summe der Massen zum Verbrauch	61
Formel 24: Korrekturfaktor für den Verbrauch in Abhängigkeit von der Masse der Maschinen und des Getriebes	62
Formel 25: Berechnung der Korrekturen aufgrund der Energiedifferenz im EDLC.....	71
Formel 26: Abstandberechnung aus GPS-Koordinaten (207).....	80
Formel 27: Berechnung von Beschleunigungs- und Verzögerungsenergien den Segmenten zwischen den potentiellen Zwangshalten.....	96
Formel 28: Gewichteter Abstand zu den potentiellen Zwangshalten.....	97
Formel 29: heuristischer Berechnungsansatz für die von Zustandsgrößen abhängige SOC- Korrektur.....	99
Formel 30: heuristischer Berechnungsansatz der vom Abstand zu den potentiellen Zwangshalten abhängigen SOC-Grenzen	100
Formel 31: Formel zur Bestimmung der SOC-Korrektur über die Einflussfaktoren für eine Lösung nahe dem Optimum.....	141
Formel 32 Formel zur Bestimmung der SOC-Korrektur über den Abstand zu potentiellen Zwangshalten für eine Lösung nahe dem Optimum.....	142
Formel 33 Formel zur Bestimmung der SOC-Korrektur über Zustandsfaktoren und den Abstand zu Zwangshalten –Lösung nahe dem Optimum	142
Formel 34 Einflussfaktoren für die Modulation der Schaltgrenzen der Hystereseregulung.....	165

14.7 EIGENE VERÖFFENTLICHUNGEN ZUM THEMA

Telematics based energy management strategies for hybrid electric vehicles (HEVs) with the special focus on heavy vehicle urban traffic (Lorries and Buses); TST06 Transport Systems Telematics; 2006, Katowice Poland

Telematik, basiertes Energiemanagement für Hybrid –Elektrische Nutzfahrzeuge im Stadtverkehr; VDI Konferenz Innovative Antriebssysteme; Dresden Deutschland, 2006

Collaborative Strategic Energy Management of Serial-Hybrid Electric Urban Buses in Operation; The 2nd International Conference on Connected Vehicles & Expo (ICCVE 2013); Las Vegas, Nevada, USA