

Optimierung des Betriebsverhaltens und der Konfiguration von dieselelektrischen Lokomotiven

**Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation**

**Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften
"Friedrich List"**

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Michael Beitelschmidt
Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Fricke

Dipl.-Ing. Robert Schimke
geboren am 14. September 1981 in Bautzen

Tag der Einreichung: 23. Februar 2012
Tag der Verteidigung: 03. Dezember 2012

**„Die Energie kann als Ursache
für alle Veränderungen in der Welt angesehen werden“**

Werner Heisenberg, 1958 ([Hei11], S. 92)

Vorwort

Einordnung und Inhalt dieser Arbeit

Diese Arbeit entstand an der Professur für Fahrzeugmodellierung und –simulation der TU Dresden in Zusammenarbeit mit der Fa. Bombardier Transportation („Bombardier Center of Competence“). In einem Teilprojekt dieser Kooperation wird die Einführung technischer Funktionen und Systeme zur Energieeinsparung bei Lokomotiven untersucht. Das Forschungsthema habe ich aufgrund der Herausforderung zur Senkung der Schadstoffemission im Schienenverkehr bei gleichzeitig steigender Transportleistung und der zunehmenden Bedeutung der Kosten zur Bereitstellung des Dieselkraftstoffs für die Fahrzeugbetreiber gewählt.

Die Nutzung von Speichertechnologien ist neben der Abwärmenutzung und der energiesparenden Fahrweise die effizienteste Maßnahme zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs bei Dieselfahrzeugen. Zusätzlich zur Rekuperation von Bremsarbeit können die Funktionen Lastpunktverschiebung und emissionsfreier Betrieb mit Hilfe eines Energiespeichers realisiert werden. Der Einsatz elektrischer Energiespeicher erweist sich als geeignet für dieselektrische Schienenfahrzeuge im Personenverkehr, da diese durch die bereits vorhandenen elektrischen Antriebskomponenten relativ einfach zu hybridisieren sind und eine nutzungsgerechte Speicherauslegung aufgrund weitgehend bekannter Fahraufgaben möglich ist.

In der Arbeit wird ein durchgängiges Verfahren zur Auslegung von dieselektrischen Lokomotiven mit Energiespeichern im Personenverkehr beschrieben. Im Fokus liegt dabei der Einsatz von Optimierungsalgorithmen zur Verbesserung des Generatorsystems und des Einsatzes von elektrischen Energiespeichern im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch und die weiteren Anteile der Lebenszykluskosten.

Das im Rahmen der Arbeit erstellte Programm zur energetischen Simulation bildet die Basis zur Untersuchung verschiedener Strategien für die Fahrtgestaltung unter Berücksichtigung der Fahrzeitreserven, den Betrieb des Energiespeichers und der Steuerung von Anlagen mit mehreren Dieselmotorgeneratorsätzen. Neben der Nutzung regelbasierter Strategien werden dabei auch vorausschauende Betriebsstrategien eingesetzt, welche die Möglichkeiten der bei Schienenfahrzeugen im Vorfeld bekannten Streckengeschwindigkeit und -topologie nutzen. Die dafür angewandten Methoden sind die Dynamische Programmierung nach BELLMANN und der äquivalenzkostenbasierte Betrieb. Die Optimierung der Fahrzeugkonfiguration wird durch einen Programmbaustein realisiert, welcher unter Berücksichtigung der Lokkonfiguration und der Energiesimulation für ein vorgegebenes Streckenprofil die Verbrauchs-, Instandhaltungs- und Anschaffungskosten für das Fahrzeug berechnet.

Kontakt

Wenn Sie sich mit dem Themenkomplex der Arbeit beschäftigen und Anmerkungen bzw. Rückfragen zur Arbeit haben, können Sie mich gerne anschreiben: robert.schimke(at)gmx.de.

Danksagung

Die tiefgreifende und kreative Bearbeitung einer wissenschaftlichen Aufgabenstellung kann nur in einem Umfeld gelingen, das den Raum für die Entfaltung und gleichzeitig die Möglichkeit zur Diskussion von Ideen bietet. Für das Anwerben des Projektes, die Ermutigung zur eigenständigen Forschung und die Unterstützung der wissenschaftlichen Arbeit möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Beitelschmidt bedanken. Die Diskussionen zur Arbeit mit dem Korreferenten Herrn Prof. Dr. Gratzfeld waren für mich sehr wertvoll.

Ohne die finanzielle Förderung durch die Firma Bombardier Transportation wäre die Anfertigung der Arbeit nicht möglich gewesen. Innerhalb des Bearbeitungszeitraums hatte ich Kontakt zu vielen Mitarbeitern der Standorte Mannheim, Zürich und Kassel. Herauszuhaben ist die Begleitung der Arbeit durch Karlheinz Geraets und Andreas Degenhardt. Die angeregten Diskussionen zum Thema, der Austausch von technischen Informationen und die Anwendung entwickelter Verfahren im Rahmen von gemeinsamen Untersuchungen haben meine Arbeit entscheidend geprägt.

An der Professur für Fahrzeugmodellierung und –simulation habe ich während der Anfertigung der Arbeit viel Zeit verbracht. Die optimistische Einstellung, der wissenschaftliche Diskurs und die gegenseitige Unterstützung meiner langjährigen Kollegen Dr. Christian Klotz, Dr. Matthias Harter, Dr. Volker Quarz, Gero Zechel und Claudius Lein haben mich diese intensive Zeit als sehr positiv erleben lassen. Einen besonderen Höhepunkt bildete dabei das tägliche Mittagessen mit den Mathematikern, bevorzugt bei schönem Wetter draußen vor der Mensa. Vielen Dank auch an Peter Hartwig, Martin Kache und Uwe Steglich von der Nachbarprofessur für die ertragreichen Schreibwochen in der Mecklenburger Einöde und die gemeinsame Meisterung sportlicher Herausforderungen.

Den von mir betreuten Diplomanden Sebastian Aschoff, Conny Tempelhahn, Georg Zimmermann, Tino Wittwer und Alexander Hegemanns möchte ich für die anregenden Diskussionen und die entstandenen gemeinsamen Veröffentlichungen auf den Themengebieten der elektrischen Energiespeicher und der energetischen Optimierung danken.

Ohne die ideelle und teilweise finanzielle Unterstützung meiner Eltern während der Ausbildungszeit hätte ich nicht die Möglichkeit bekommen, diese Arbeit anzugehen. Meiner Freundin Astrid, meiner Familie und meinen Freunden möchte ich für das Verständnis gegenüber meiner Arbeit und der, besonders in der Endphase, einhergehenden hohen Arbeitsbelastung danken.

Verwendete Formelzeichen	xi
Abkürzungen.....	xvi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Möglichkeiten zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs.....	3
1.3 Einordnung und Abgrenzung der Arbeit.....	4
1.4 Ganzheitlicher Optimierungsansatz.....	6
1.4.1 Überblick.....	7
1.4.2 Fahrzeugsimulation.....	7
1.4.3 Optimierung der Betriebsstrategie.....	7
1.4.4 Optimierung der Fahrzeugkonfiguration	8
1.5 Gliederung und Aufbau der Arbeit	9
2 Die dieselelektrische Traktion mit Energiespeicher.....	10
2.1 Einordnung.....	10
2.2 Referenzlokomotive und Zugkonfiguration	11
2.3 Aufbau und Komponenten	11
2.3.1 Überblick und Energiefluss	11
2.3.2 Dieselmotorgeneratorsatz.....	12
2.3.3 Zwischenkreis und Umrichtertechnik.....	13
2.3.4 Fahrmotoren und Getriebe	13
2.3.5 Nebenaggregate.....	13
2.4 Messfahrt auf der Strecke Hamburg - Cuxhaven	14
2.4.1 Ziele	14
2.4.2 Betriebscharakteristik	15
2.4.3 Versuchsdurchführung.....	15
2.4.4 Datenverarbeitung	16
2.5 Energiefluss der dieselelektrischen Lokomotive	16
2.5.1 Erstellung eines Energieflussdiagramms	16
2.5.2 Auswertung und Schlussfolgerungen.....	18
2.6 Energiespeicher für dieselelektrische Fahrzeuge.....	20

2.6.1	Allgemeine Anforderungen an Traktionsenergiespeicher.....	20
2.6.2	Betriebszielspezifische Anforderungen.....	21
2.6.3	Vorevaluation der Speichertechnologien.....	21
2.6.4	Doppelschichtkondensatoren	25
2.6.5	Sekundärbatterien	27
2.6.6	Vergleichende Betrachtung.....	30
2.6.7	Integration von Energiespeichern in dieselelektrische Fahrzeuge	36
3	Modellbildung und Simulation	40
3.1	Zielstellung.....	40
3.2	Fahrdynamik von Schienenfahrzeugen.....	40
3.2.1	Fahrzeugmasse	41
3.2.2	Zug- und Bremskraft.....	41
3.2.3	Zugwiderstand.....	42
3.2.4	Streckenhöchstgeschwindigkeit und Streckenwiderstände	43
3.2.5	Berechnung der schnellstmöglichen Fahrt.....	44
3.3	Verfahren zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs	44
3.3.1	Berechnung des Differenzverbrauchs über die Differenzleistungsmethode.....	44
3.3.2	Berechnung des Verbrauchs für Lastkollektive	45
3.3.3	Berechnung des Verbrauchs für Strecken mithilfe von quasistatischen Verfahren ...	47
3.3.4	Dynamische Modelle	49
3.3.5	Zusammenfassende Bewertung	50
3.4	Auswahl der Simulationsumgebung	51
3.4.1	Textbasierte Programmierung.....	52
3.4.2	Signalflussbasierte Programmierung	52
3.4.3	Physikalische Darstellung	53
3.4.4	Zusammenfassende Bewertung	53
3.5	Aufstellung eines geeigneten Simulationssystems	54
3.6	Abbildung der Elemente.....	55
3.6.1	Dieselmotorgeneratorsatz.....	55
3.6.2	Zwischenkreis und Leistungselektronik	61
3.6.3	Fahrmotoren und Getriebe	63

3.6.4	Nebenaggregate.....	64
3.6.5	Bremsen.....	64
3.7	Elektrische Energiespeicher	66
3.7.1	Ladezustandsbestimmung.....	67
3.7.2	Spannungsverhalten und Ersatzschaltbild.....	67
3.7.3	Lade-/Entladeströme	70
3.7.4	Leistungsbestimmung und Verluste	71
3.7.5	Thermisches Verhalten	71
3.7.6	Alterungsverhalten.....	72
3.8	Grundlegende Programmbausteine.....	72
3.8.1	MATLAB-GUI und Datenaufbereitung	72
3.8.2	Aufstellen des Belastungsprofils aus Streckendaten	73
3.8.3	Erstellung des Fahrprofils	75
3.8.4	Leistungsbereitstellung und Verbrauchsrechnung	77
3.8.5	Speicherdefinition	79
3.8.6	Ausgleich des Ladezustands der Speicher	81
3.9	Validierung mit Hilfe von Messdaten	81
3.9.1	Ermittlung der Fahrwiderstandskoeffizienten.....	81
3.9.2	Nachbildung der Fahrregime	84
3.9.3	Reproduktion einer vollständigen Fahrt.....	86
3.9.4	Zusammenfassung	88
4	Optimierung von Betriebsstrategien von Fahrzeugen mit Energiespeicher	89
4.1	Zielgrößen und Bewertungskriterien.....	89
4.2	Theorie der optimalen Steuerung	90
4.2.1	Optimale Steuerung mit spezifiziertem Endzustand	90
4.2.2	Optimale Steuerung mit beschränkten Eingängen.....	91
4.2.3	Computergestützte Lösungsverfahren.....	91
4.3	Optimierung der Fahrweise.....	94
4.3.1	Energiesparende Fahrweise in der Praxis.....	94
4.3.2	Fahrerassistenzsysteme	94
4.3.3	Problemformulierung.....	95

4.3.4	Fahrregime unter Anwendung des Maximumprinzips	98
4.3.5	Dynamische Programmierung	104
4.3.6	Weitere Ergebnisse	112
4.3.7	Zusammenfassende Betrachtung.....	114
4.4	Aufstellung und Optimierung von Speicherstrategien	115
4.4.1	Speicherstrategie nach Betriebsziel.....	115
4.4.2	Möglichkeiten der Formulierung von Betriebsstrategien.....	116
4.4.3	Randbedingungen und Grenzen.....	119
4.4.4	Entwicklung von regelbasierten Strategien	121
4.4.5	Vorausschauender Speicherbetrieb	124
4.4.6	Untersuchung der ECMS	127
4.4.7	Vergleichende Betrachtung.....	133
4.4.8	Zusammenfassung.....	139
4.5	Kopplung der Optimierungsprobleme	140
4.5.1	Verlängerung der Rekuperationsdauer durch Nutzung der Mehrfahrzeit.....	141
4.5.2	Abhängigkeit der Kraftstoffeinsparung von der Mehrfahrzeit	142
4.5.3	Auswirkung der Leistungserhöhung durch Speichereinsatz.....	144
4.5.4	Zusammenfassung.....	145
5	Optimierung der Motorsteuerung von Mehrmaschinenanlagen	146
5.1	Einführung.....	146
5.2	Motor-Start/Stopp-Funktion bei Mehrmaschinenanlagen	147
5.3	Umsetzung.....	148
5.3.1	Konstruktive Integration	148
5.3.2	Elektrische Integration.....	148
5.3.3	Start/Stopp-System	149
5.4	Topologien.....	150
5.5	Optimierung auf Basis repräsentativer Betriebspunkte	151
5.5.1	Optimierung der Generatorkurve.....	152
5.5.2	Steuerung der Lastverteilung.....	153
5.6	Einbindung in ein Regelungskonzept und dynamische Simulation	156
5.7	Zusammenfassung	158

6	Optimierung der Fahrzeugauslegung.....	159
6.1	Vorgehen.....	159
6.2	Randbedingungen und Grenzen.....	160
6.3	Mehrkriterielle Optimierung	161
6.3.1	Grundlagen	161
6.3.2	Anwendung auf die Problemstellung.....	163
6.4	Implementierung.....	163
6.4.1	Evolutionäre Algorithmen.....	163
6.4.2	Einbettung in die vorhandene Programmstruktur.....	165
6.4.3	Auswahl von Entwurfsvariablen.....	165
6.4.4	Aufstellung der Zielfunktionen.....	166
6.5	Sensitivitätsanalyse.....	167
6.5.1	Vorgehen.....	167
6.5.2	Strecken- und umgebungsspezifische Einflussgrößen	169
6.5.3	Ökonomische Randbedingungen	170
6.5.4	Fahrzeugspezifische Parameter.....	170
6.5.5	Parameter der Betriebsstrategie	171
6.5.6	Schlussfolgerung	171
6.6	Untersuchung der speicherrelevanten Parameter mit Hilfe einer Parametervariation.....	172
6.7	Anwendung evolutionärer Algorithmen.....	174
6.7.1	Entwurfsraum.....	174
6.7.2	Mehrzieloptimierung	175
6.8	Schlussfolgerung	178
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	179
8	Verzeichnisse.....	182
8.1	Literatur.....	182
8.2	Abbildungen	195
8.3	Tabellen.....	201
A.	Ergänzende Informationen	203
B.	Simulationswerkzeug und Parameter	210

C. Simulationsergebnisse.....	213
-------------------------------	-----

Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
A	[m ²]	Fläche
C	[F]	elektrische Kapazität
E	[J]	Energie
E_{spez}	[J/kg]	spezifische gravimetrische Energie
F	[N]	Kraft
F_a	[N]	Beschleunigungskraft
F_W	[N]	Fahrwiderstandskraft
F_N	[N]	Neigungskraft
F_{Bo}	[N]	Bogenwiderstandskraft
F_G	[N]	Gewichtskraft
F_B	[N]	Bremskraft
F_T	[N]	Traktionskraft
F_{RS}	[N]	Kraft im Rad-Schiene-Kontakt
F_z	[·]	Fahrzustand
I	[A]	elektrischer Strom (Effektivwert)
J	[kgm ²]	Trägheitsmoment
K	[€]	Kosten
L	[s]	Lebensdauer
M	[Nm]	Moment
N	[·]	Anzahl
P	[W]	Leistung
P_{spez}	[W/kg]	spezifische gravimetrische Leistung
Q	[C]	elektrische Ladung
R	[Ω]	elektrischer Widerstand
S	[VA]	Scheinleistung

T	[K]	Temperatur
U	[V]	Spannung (Effektivwert)
V	[m ³]	Volumen
W	[J]	Arbeit
a	[m/s ²]	Beschleunigung
b_e	[g/kWh]	spezifischer Verbrauch
c_w	[\cdot]	Strömungswiderstandskoeffizient
d	[m]	Durchmesser
f	[Hz]	Frequenz
f_w	[\cdot]	normalkraftbezogener Fahrwiderstand
g	[m/s ²]	Schwerebeschleunigung
h	[m]	Höhe
b_{rel}	[\cdot]	relative Häufigkeit
i	[A]	elektrischer Strom (Momentanwert)
i_{GET}	[\cdot]	Getriebeübersetzung
i_N	[1/1000]	Steigung
j	[m/s ³]	Ruck
k		Konstante (kontextbezogen)
l	[m]	Länge
m	[kg]	Masse
m_{Kr}	[kg]	Kraftstoffverbrauch (Masse)
n	[U/min]	Drehzahl (aus Kontext ersichtlich)
n	[\cdot]	Anzahl (aus Kontext ersichtlich)
p	[\cdot]	normierter Parameter zur Beschreibung von Fahrtrajektorien (siehe S. 101)
r	[m]	Radius
s	[\cdot]	Schlupf (aus Kontext ersichtlich)

s	[m]	Streckenpunkt (aus Kontext ersichtlich)
t	[s]	Zeit
u	[V]	elektrische Spannung (Momentanwert)
v	[m/s]	Geschwindigkeit
ζ	[-]	Zustand
q	[-]	reziproker Ladezustand
α	[rad/s ²]	Winkelbeschleunigung
η	[-]	Wirkungsgrad
λ	[kg/J]	Äquivalenzkostenfaktor
μ	[-]	Kraftschlussbeiwert
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ω	[rad/s]	Winkelgeschwindigkeit
ξ	[-]	dynamischer Massefaktor

Index	Bedeutung		
B6	B6-Gleichrichter	Err	Erregung
BAT	Akkumulator (Sekundärbatterie)	Fe	Eisen
DC/DC	Gleichspannungswandler	Fw	Fahrwiderstand
DSK	Doppelschichtkondensator	Kr	Kraftstoff
FM	Fahrmotor	Reib	Reibung
GEN	Generator	Sp	Schwerpunkt
GET	Getriebe	St	Strecke
HBU	Hilfsbetriebsumrichter	T	Traktion
HA	Hilfsanlage	V	Verlust
HM	Hilfsmaschine	a	außen
KW	Kurbelwelle	abs	absolut
LE	Leistungselektronik	ausr	ausroll
LOK	Lokomotive	äqui	äquivalent
PWR	Pulswechselrichter	boost	boosten (engl., verstärken)
SE	Speichereinheit	dyn	dynamisch
SPE	Speicher	eff	effektiv
VKM	Verbrennungskraftmaschine	el	elektrisch
WAG	Wagen	entn	entnommen
ZK	Zwischenkreis	entl	entladen
ZEV	Zugenergieversorgung	ges	gesamt
ZUG	Zugverband bestehend aus Lokomotive und Wagen	i	innen
		ist	Istwert
		kin	kinetisch
A	Anfang	korr	korrigiert
B	Bremsung	l	laden
Bo	Bogen	max	maximal
E	Ende	mech	mechanisch

min	minimal
nom	nominell
norm	normiert
opt	optimal
orig	original
pot	potentiell
präd	prädiert
red	reduziert
rel	relativ
rek	rekuperativ
soll	Sollwert
spez	spezifisch
st	steigend
stat	statisch
var	variabel

Systemgrößen und Operatoren

u	Eingangsgröße
x	Zustandsgröße
y	Ausgangsgröße
z	diskrete Zustandsgröße
$f(\cdot)$	Funktion von (keine feste Bedeutung, erschließt sich aus dem Kontext)
\dot{x}	Zeitableitung
$\Delta \cdot$	Differenzgröße

Abkürzungen

AC	Wechselstrom (engl. Alternating Current)
BRIC-Staaten	zusammenfassend für die Staaten Brasilien, Russland, Indien und China
BT	Bombardier Transportation GmbH
CAE	rechnergestützte Entwicklung (engl. Computer-Aided Engineering)
CFD	Numerische Strömungsmechanik (engl. Computational Fluid Dynamics)
DAE	differentiell-algebraische Gleichung (engl. Differential Algebraic Equation)
DB	Deutsche Bahn AG
DC	Gleichstrom (engl. Direct Current)
DOD	relative Entladetiefe (engl. Depth of Discharge)
DP	dynamische Programmierung
DSK	Doppelschichtkondensator
EBuLa	Elektronischer Buchfahrplan und Langsamfahrstellen
ECMS	äquivalenzkostenbasierter Betrieb (engl. Equivalent Consumption Minimization Strategy)
ESF	Energiesparende Fahrweise
ESR	äquivalenter Serienwiderstand (engl. Equal Series Resistance)
Fa.	Firma
FEM	Finite-Elemente-Methode
GE	General Electric AG
Genset	Verbrennungsmotor-Generator-Einheit
GPS	globales Navigationssatellitensystem (engl. Global Positioning System)
HE	engl. High Energy (Hochenergie), insbesondere im Zusammenhang mit Sekundärbatterien
HP	engl. High Power (Hochleistung), insbesondere im Zusammenhang mit Sekundärbatterien
HTK	Hochtemperaturkühlkreislauf
Kfz	Kraftfahrzeug

LCC	Lebenszykluskosten (engl. Life Cycle Cost)
LPA	Lastpunktanhebung
Li-Ionen	Lithium-Ionen
LNVG	Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen
MVB	Fahrzeugbus (engl. Multi Vehicle Bus)
NiCd	Nickelcadmium
NiMH	Nickelmetallhydrid
NTK	Niedertemperaturkühlkreislauf
ODE	Gewöhnliche Differentialgleichungen (engl. Ordinary Differential Equations)
SCR	selektive katalytische Reduktion (engl. Selective Catalytic Reduction)
SOC	energetischer Ladezustand (engl. State of Charge)
SOC _Q	coulombscher Ladezustand
SOH	Alterungszustand (engl. State of Health)
Solver	engl., numerischer Gleichungslöser
TEG	thermoelektrischer Generator
VKM	Verbrennungskraftmaschine

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Mobilitätsbedürfnis der Menschen ist unter dem Trend zur Globalisierung, dem zusammenwachsenden Europa und der geforderten Flexibilität von Arbeitnehmern ungebrochen. Zeitgleich nimmt durch die verstärkte Arbeitsteilung und progressiven Welthandel der Güterverkehr stark zu [Inn10]. Neben dem Bedarf an neuen Verkehrswegen zur Sicherstellung der Transportkapazität steigt damit auch die Umweltbelastung in Form von Emissionen und Lärm durch den Verkehr.

Dieser Entwicklung kann durch umweltfreundliche Fortbewegungsmittel entgegengewirkt werden, um den Beitrag des Verkehrssektors zur Erfüllung der umweltpolitischen Ziele des Kyoto-Protokolls leisten zu können. Der Schienenverkehr spielt dabei eine herausragende Rolle. Schienenfahrzeuge haben aufgrund der hohen Förderkapazität und geringen Fahrwiderständen einen sehr geringen Energieverbrauch pro Personenkilometer. Mit elektrischen Bahnen kann prinzipiell lokal emissionsfrei gefahren werden, jedoch müssen in der Ökobilanz der verwendete Strommix und die Übertragungsverluste berücksichtigt werden. 51,7 Prozent der Strecken in Deutschland und rund Dreiviertel der Strecken weltweit sind nicht elektrifiziert [Fli06]. Dieselbetriebene Schienenfahrzeuge werden trotz eines größeren Primärenergiebedarfs [Beh08] und höherer Emissionen auch weiterhin eine wichtige Rolle spielen. Der Grund sind die hohen Kosten für die Elektrifizierung von Strecken, sodass diese für Nebenstrecken oder lange Strecken mit geringer Zugfrequenz nicht in Frage kommt.¹

In dieser Arbeit sollen Methoden zur Berechnung und Optimierung des Kraftstoffverbrauchs einer dieselelektrischen Lokomotive für eine vorgegebene Strecke vorgestellt werden. Ziel ist es, die Einführung neuer Funktionen und Systeme zur Energieeinsparung auf den gesamten Kraftstoffverbrauch einer dieselelektrischen Lokomotive zu untersuchen. Die dieselelektrische Lokomotive besitzt einen seriellen Antriebsstrang, in dem die chemische Energie des Kraftstoffs in einem Dieselmotor in mechanische Arbeit und über den Generator in elektrische Arbeit gewandelt wird, die den Antrieben zur Verfügung steht.

In Verbindung mit einem zu Traktionszwecken genutzten Energiespeicher ergibt sich ein serieller Hybrid. Diese Topologie hat neben dem Einsatz in Schienenfahrzeugen eine hohe Bedeutung bei mobilen Arbeitsmaschinen wie dieselelektrischen Hafenmobilkränen. Unter Berücksichtigung der grundsätzlich verschiedenen Antriebe und Lastspiele können die erarbeiteten Vorgehensweisen auch auf diese Systeme übertragen werden [SBT+11]. In der Kraftfahrzeugindustrie haben sich serielle Hybirdfahrzeuge wegen der hohen Investitionskosten und der großen Zusatzmasse für einen auf volle Leistung ausgelegten elektrischen Antriebsstrang nicht durchgesetzt.

¹ Die Kosten für die Elektrifizierung von Strecken für normale Fahrgeschwindigkeiten sind stark streckenabhängig. Als Richtwert können jedoch eine Million Euro pro Kilometer ohne Berücksichtigung zusätzlicher Maßnahmen zur Streckenverbesserung (Schienen, Zugsicherungssysteme etc.) angesehen werden [Bus08].

Eine Herausforderung bei der Auslegung von Schienenfahrzeugen ergibt sich daraus, dass die Anfertigung von Prototypenfahrzeugen aufgrund der hohen Kosten unüblich ist. In der Regel werden Lokomotiven für einen neuen Auftrag auf Basis einer bereits bestehenden Baureihe modifiziert oder rechnergestützt neu entwickelt. Die Inbetriebnahme findet anschließend im Vorfeld der Auslieferung mit dem ersten gebauten Fahrzeug statt. Gleichzeitig sinkt die Zeit für die Erstellung von Angeboten stetig. Dieses Vorgehen macht den Einsatz computergestützter Berechnungsverfahren erforderlich. Diese sollten eine dem Verwendungszweck angepasste Darstellungstiefe besitzen. Im Sinne eines möglichst effizienten Entwicklungsprozesses muss auf moderate Rechenzeiten und die Möglichkeit von weitgehend automatisierten Optimierungsvorgängen Wert gelegt werden.

Die Berechnung der Leistungsfähigkeit und der Energieeffizienz der Fahrzeuge ist ein Bereich, in dem bereits seit längerem CAE-Werkzeuge eingesetzt werden. Die Ermittlung von Fahrschaubildern und des Energieverbrauchs bei Schienenfahrzeugen ist Stand der Technik. Die in vielen Zugfahrtssimulationsprogrammen verwendeten Zugkraftdiagramme stoßen jedoch bei der Anwendung auf dieselelektrische Fahrzeuge an ihre Grenzen, da bei drehzahlvariablen Antrieben die Beschleunigung des Dieselmotors und daraus folgend der verzögerte Anstieg der Leistung beachtet werden muss. Erforderliche Anpassungen sollen in dieser Arbeit erarbeitet werden, damit fehlerhafte Fahrtzeitberechnungen und Verbrauchsangaben vermieden werden. Der Ansatz wird durch Messfahrten auf einer Regionalexpressstrecke überprüft.

Weiterhin sind die Einbindung von fahrzeugseitigen Energiespeichern und die Implementierung der auf Dieselfahrzeuge abgestimmten energieoptimalen Fahrweise für dieselelektrische Fahrzeuge in derartigen Programmen heute noch nicht verbreitet. Diese beiden Möglichkeiten zur Verbrauchsreduzierung gegenüber einem konventionellen Fahrzeug mit Spitzfahrt² weisen mit jeweils über zehn Prozent die größten Einsparpotentiale bei dieselbetriebenen Fahrzeugen auf. Bei der Betrachtung der Einbindung von Energiespeichern ist eine gleichzeitige Überprüfung der Fahrstrategien notwendig, um das Einsparpotential bestmöglich auszunutzen und den Kraftstoffverbrauch exakt zu ermitteln.

Außerdem soll die Möglichkeit der Verbrauchsoptimierung durch den Einsatz von Lokomotiven mit mehreren Dieselmotorgeneratorsätzen überprüft werden. Dort wird insbesondere auf die optimale Auslegung von Betriebsstrategien zur Motorabschaltung Wert gelegt, welche eine besondere Verbrauchseinsparung verspricht.

Neben dem Umweltaspekt ist der Energieverbrauch der Fahrzeuge auch aus ökonomischen Gründen relevant. Bereits heute macht der Energieverbrauch bei dieselgetriebenen Bahnfahrzeugen den größten Anteil der Kosten innerhalb des Lebenszyklus aus [Vit07]. Diese Entwicklung wird durch die schwankungsbereinigte steigenden Kraftstoffpreise noch verstärkt. Eine Simulation, die in der Stapelverarbeitung durchgeführt werden kann, bietet nun die Möglichkeit zur Konfigurationsopti-

² Spitzfahrt bezeichnet die schnellstmögliche Fahrt unter Einhaltung gegebener Randbedingungen (z. B. Höchstgeschwindigkeit, typische Verzögerung) im normalen Betrieb.

mierung mithilfe einer mehrkriteriellen Optimierung. Als Kriterien bieten sich hier die Bestandteile der Lebenszykluskosten (LCC) an, die angepasst an Ausschreibungsbedingungen verschieden gewichtet werden können. Die Optimierung kann als Grundlage für die einsatzspezifische Auslegung von skalierbaren Energiespeicherlösungen dienen.

1.2 Möglichkeiten zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs

Die Möglichkeiten zur Verbrauchsreduktion von dieselelektrischen Fahrzeugen können in die Kategorien Betrieb (Fahrplangestaltung), Fahrzeugsteuerung und Fahrzeugkomponenten unterteilt werden. Im Bereich der Fahrplangestaltung besteht die Möglichkeit zur vorausschauenden Reduzierung betriebsbedingter Zwischenhalte (Signale, Warten auf Fahrzeuge), zur optimierten Zugbereitstellung (Reduzierung von Leerfahrten) und der Anpassung des Zugeinsatzes auf den vorherrschenden Bedarf (Anzahl der Wagen, Takt). Bei bestehendem Fahrplan können nunmehr noch die Fahrzeugsteuerung und die Fahrzeugkomponenten optimiert werden.

Die Fahrzeugkonfiguration kann durch den Einsatz von wirkungsgradoptimierten Komponenten oder durch Systeme zur Vermeidung von Abwärme verbessert werden. Beispiele für die Möglichkeiten sind:

- der Einsatz von effizienter Antriebstechnik (Diesel- und Fahrmotoren, Generatoren und verlustarme Leistungselektronik),
- die Steigerung der Effizienz von Hilfsanlagen und Hilfsmaschinen (intelligente Steuerkonzepte, Einsatz wirkungsgradoptimierter Komponenten),
- der Einsatz von elektrischen, thermischen, chemischen oder mechanischen Energiespeichern,
- die Rekuperation von Energie in den Antriebsstrang (elektrisches Bremsen, Einsatz von thermoelektrischen Generatoren) und die
- Verringerung der Fahrwiderstände (Verbesserung der Aerodynamik, leichtlaufende Radsätze, Gewichtsreduktion).

Die genannten Maßnahmen können die Effizienz des Fahrzeugs bei gleicher Betriebsführung erhöhen. Den möglichen Einsparungen steht typischerweise der Austausch von vorhandenen Komponenten durch teurere Systeme bzw. der Einbau zusätzlicher Komponenten entgegen.

Auf Seiten der Fahrzeugsteuerung besteht die Herausforderung, das Fahrzeug bzw. Komponenten so anzusteuern, dass gegebene Randbedingungen des Fahrplans, der Betreiber oder auch des Kunden (z. B. Komfort) eingehalten werden und gleichzeitig das Verbrauchsverhalten minimiert wird. Maßnahmen sind:

- die energiesparende Fahrweise im Rahmen der Fahrzeitreserve,
- die effiziente Steuerung von Nebenaggregaten wie beispielsweise Lüftern und der Fahrzeugklimatisierung,

- die effiziente Steuerung des Generatorsatzes (z. B. Einsatz der Start/Stopp-Funktion, Fahren einer verbrauchsoptimalen Generatorkurve) und
- das intelligente Thermomanagement im Fahrzeug (z. B. schnelle Aufheizung des Dieselmotors).

Die aufgeführten Maßnahmen sind primär Softwarefunktionen. Dennoch entsteht bei der Realisierung ein Mehraufwand durch die Beschaffung von Hardware in Form von Steuergeräten bzw. regelbaren Komponenten.

1.3 Einordnung und Abgrenzung der Arbeit

Zu den einzelnen Teilespekten der Simulation und Optimierung des Kraftstoffverbrauchs von dielektrischen Fahrzeugen ist eine Vielzahl von Veröffentlichungen, z. T. aus verwandten Gebieten wie der Kraftfahrzeugtechnik, bekannt.

Programme zur energetischen Berechnung von Schienenfahrzeugen

Programme zur energetischen Berechnung von Schienenfahrzeugen sind heute Stand der Technik. Für die Kalkulation stehen Softwarelösungen zur Verfügung, die von Schienenfahrzeugherrstellern oder Ingenieurdienstleistern entwickelt und gepflegt werden. Die meisten Programme sind für die universitäre Forschung nur eingeschränkt verfügbar. Die kostenfreie Verwendung oder gar die Einsichtnahme in den Quellcode ist in der Regel nicht möglich. Beispiele für verfügbare Programme sind im Anhang in Tabelle A-1 aufgeführt.

Literatur zu Antriebssträngen mit Energiespeichern und deren Modellierung

Eine Dissertation zur Abbildung eines seriellen hybriden Kraftfahrzeugantriebsstrangs in der Simulation wurde von WÄLTERMANN veröffentlicht, wobei das Hauptaugenmerk auf der Erprobung des Antriebsstrangs mit Hilfe von Hardware-in-the-Loop-Prüfständen liegt [Wäl00]. Serielle Hybridfahrzeuge haben sich jedoch in der Kraftfahrzeugtechnik nicht durchgesetzt. Studien zu anderen Hybridtopologien können dennoch bei der Modellierung von Teilkomponenten als Quelle genutzt werden. So wurden z. B. die theoretisch ermittelten Wirkungsgrade von Teilkomponenten und dem Gesamtsystem eines Antriebsstrangs eines Parallelhybridfahrzeugs in der Dissertation von GUTTENBERG [Gut04] nachgewiesen. In einem Buch von GUZELLA [GS07] wurden bereits einige Ansätze zur Modellierung und Optimierung von Fahrzeugantriebssystemen zusammenfassend dargestellt.

Im Bereich der Schienenfahrzeuge sind vor allem Speicherlösungen in Straßenbahnen realisiert worden. Fahrzeuge werden unter anderem von den Firmen BT (MITRAC Energy Saver, [SKP07]), Stadler (Variobahn, [Blo11]) und Siemens (Sitras HES, [Mei08]) angeboten. Die Lösung der Fa. Siemens sieht neben einem Doppelschichtkondensator einen Batteriespeicher mit NiMH-Batterien vor, welcher das Fahren in oberleitungsfreien Streckenabschnitten zulässt. Ein Prototypfahrzeug der Fa. Stadler fuhr am 25. Mai 2011 16 km ohne Oberleitung. Der Einsatz eines Li-Ionen-Batteriespeichers ermöglichte das erfolgreiche Absolvieren dieses langen Fahrtabschnittes.

Der Einsatz von Energiespeichern im Bereich der Vollbahnen zur Energerekuperation wurde unter anderem mit der Einbindung von Schwungradspeichern in einem dieselelektrischen Triebwagen untersucht, was im Experimentalfahrzeug LIREX mündete [Söf05]. Eine weitere Arbeit in Zusammenarbeit mit der Fa. Voith beschäftigt sich mit der Integration eines hydraulischen Energiespeichers in einen dieselhydraulischen Triebwagen [Dis10]. Beide Arbeiten bescheinigen die Funktionsweise von Energiespeichern auf dem Fahrzeug. Jedoch weisen die eingesetzten Energiespeicher Nachteile aufgrund der geringen spezifischen Energie beim Einsatz auf Vollbahnen auf, da die gegenüber Straßenbahnen längeren Bremszyklen für Energiespeicher mit geringen Ladezeiten ungünstig sind.

Traktionsenergiespeicher kommen bei Diesellokomotiven bisher vor allem im Bereich von Rangierlokomotiven zum Einsatz. So wurden in den USA von der Fa. Railpower über 60 Lokomotiven mit Bleibatterien aufgebaut (Green Goat, [Cou06]). Die Fa. Alstom präsentierte auf der Innotrans 2010 ein Fahrzeug mit NiCd-Batterien [OD09]. Die primären Zielstellungen bei diesen Fahrzeugen sind die Verstetigung der Leistungsanforderung an den Dieselmotor und die Möglichkeit der Dieselmotorabschaltung in Leerlaufphasen. Die Bremsrekuperation mit zyklischer Zellbelastung ist bei den verwendeten Zelltypen wegen der Speicherlebensdauer kritisch zu sehen.

Im Bereich des Personenverkehrs entwickelte die Fa. JR East in Zusammenarbeit mit Hitachi einen „New Energy Train“, welcher in Japan getestet wurde [TTO04]. Nachfolgend wurde in England ein Intercity-Zug mit Lithium-Ionen-Batterien von Hitachi erfolgreich erprobt [TST08]. Trotz der erreichten Kraftstoffeinsparungen von bis zu 20 Prozent ist die Verbreitung der Technologie jedoch noch nicht weit fortgeschritten. Die Fahrzeughersteller führen als Gründe dafür die hohen Kosten und die mangelnde Verfügbarkeit sicherer und leistungsfähiger Zellen an.

Die Entwicklung von Speichersystemen macht dennoch, getrieben durch die Entwicklung in der Automobilindustrie, große Fortschritte. Für Elektro- und Hybridfahrzeuge werden zulassungsfähige Speichersysteme entwickelt. Mit dem Mercedes S400 kam das erste Serienhybridfahrzeug mit Li-Ionen-Batterie auf den Markt [Bra10]. Wichtig ist nun für die Hersteller von dieselelektrischen Schienenfahrzeugen, die Technologie in ihre Anwendungsbereiche zu transferieren und die Wirtschaftlichkeit von verschiedenen Speichertechniken spezifisch auf das Anwendungsszenario nachzuweisen. Dazu muss auch die energiesparende Fahrweise betrachtet werden, weil diese die Lastkollektive der Lokomotive stark beeinflusst.

Literatur zur energiesparenden Fahrweise

Zur energiesparenden Fahrweise werden seit langem Untersuchungen durchgeführt. Sie ist Bestandteil bei der Ausbildung von Lok- und Triebfahrzeugführern [MLMH08], die heute z. T. durch computergestützte Hilfssysteme unterstützt werden. Ein Beispiel dafür ist die Integration einer Ausrollanzeige in das EBuLa-System³ der DB [Leh07].

³ EBuLa: Elektronischer Buchfahrplan und Langsamfahrstellen

Die Theorie zur Berechnung der optimalen Fahrweise auf einem Streckenabschnitt mit Hilfe von Fahrregimen wurde in der Dissertation von LINDER [Lin04] erörtert. Übergeordnet wird in der Dissertation von ALBRECHT die Verbesserung der betrieblichen Planung mit den Zielen nachfrageorientierte Optimierung des Beförderungsangebots und Energiekosten minimierende Flexibilisierung von Anfahr und Bremsvorgängen betrachtet [Alb04]. Die Optimierung erfolgt mit Hilfe genetischer Algorithmen. Weiterhin fasst er in einem Buchbeitrag den Stand der Technik der Vorgehensweise bei der Entwicklung von energiesparenden Fahrweisen zusammen [Alb08]. Eine Softwarelösung zum Betrieb in Nahverkehrsnetzen wurde mit dem Programm ENAflex-S vorgestellt und getestet [Kri09]. Von Fahrzeugherstellern werden ebenfalls Fahrtplanungsassistenten angeboten, welche den Fahrzeugenergieverbrauch minimieren. So mündeten z. B. die theoretischen Vorarbeiten in [Fmt02] in dem Produkt Driving Style Manager der Fa. BT [WLSK10]. Ein ähnliches Produkt bietet die Fa. GE mit dem Trip Optimizer an [KSH+07].

Einordnung der Arbeit

Die im Bereich der energiesparenden Fahrweise entwickelten Varianten bieten bisher noch keine Möglichkeit zur Berücksichtigung der Anforderungen elektrischer Energiespeicher. Da eine nicht unerhebliche Beeinflussung der Rekuperationsmöglichkeiten durch die Fahrstrategie angenommen wird, soll diese in der Arbeit untersucht werden.

Die Analyse soll die Anforderungen an eine energetische Gesamtfahrzeubetrachtung erfüllen. Damit liegt der Schwerpunkt der Arbeit auf der Analyse des Antriebsstrangs. Benötigte Wirkungsgradkennfelder und Kennwerte werden aus Komponentenversuchen oder Bauteilsimulationen entnommen. Die untersuchte Fahrzeugtopologie ist die dieselelektrische Lokomotive. Die verwendeten Algorithmen können jedoch auch auf andere Maschinen oder Fahrzeuge mit dieselelektrischem Antriebsstrang und mit der Einschränkung der fehlenden Abbildung des Netzes auch auf elektrische Bahnen angewendet werden.

Abgrenzung

Die Untersuchung wird dabei folgendermaßen eingeschränkt. Die gegenseitige Zugbeeinflussung in realen Fahrten wird nicht betrachtet. Es wird somit von einer fahrplanmäßigen Fahrt ohne Signalbeeinflussung und nichtfahrplanmäßigen Halten ausgegangen. Bei den Betrachtungen zur energiesparenden Fahrweise wird vorausgesetzt, dass geeignete Systeme zur Fahrtvorgabe auf dem Fahrzeug verfügbar sind. Weiterhin werden bei der Analyse von Kraftstoffverbräuchen die Aufwendungen zur Herstellung, Verarbeitung und Transport des Kraftstoffs nicht berücksichtigt.

1.4 Ganzheitlicher Optimierungsansatz

Ziel der Arbeit ist es, ein Simulationswerkzeug aufzubauen und Verfahren aufzuzeigen, die die Auslegung und die Evaluierung von neuen Funktionalitäten zur Kraftstoffeinsparung bei dieselelektrischen Fahrzeugen ermöglichen.

1.4.1 Überblick

Der Ablauf der Simulation soll entsprechend der erforderlichen Schritte kaskadiert erfolgen (Abbildung 1-1). Die Hauptbestandteile sind die Modellierung des Kraftstoffverbrauchs und Speicherverschleißes für ein bestimmtes Fahrzeug. Dafür muss in einer inneren Schleife nach Vorgabe eines Fahrzyklus eine optimale Fahr- und Betriebsstrategie für ein Fahrzeug gefunden werden. Eine äußere Optimierungsschleife erweitert das Verfahren anschließend um eine Fahrzeugoptimierung. Diese erfolgt hinsichtlich der Lebenszykluskosten (LCC) für ein vorher definiertes Einsatzspektrum. Eine Prüfung, ob gegebenenfalls Optimierungsschritte zusammengefasst werden können, wird nach Evaluation der Umsetzungsmöglichkeiten in den späteren Kapiteln erfolgen.

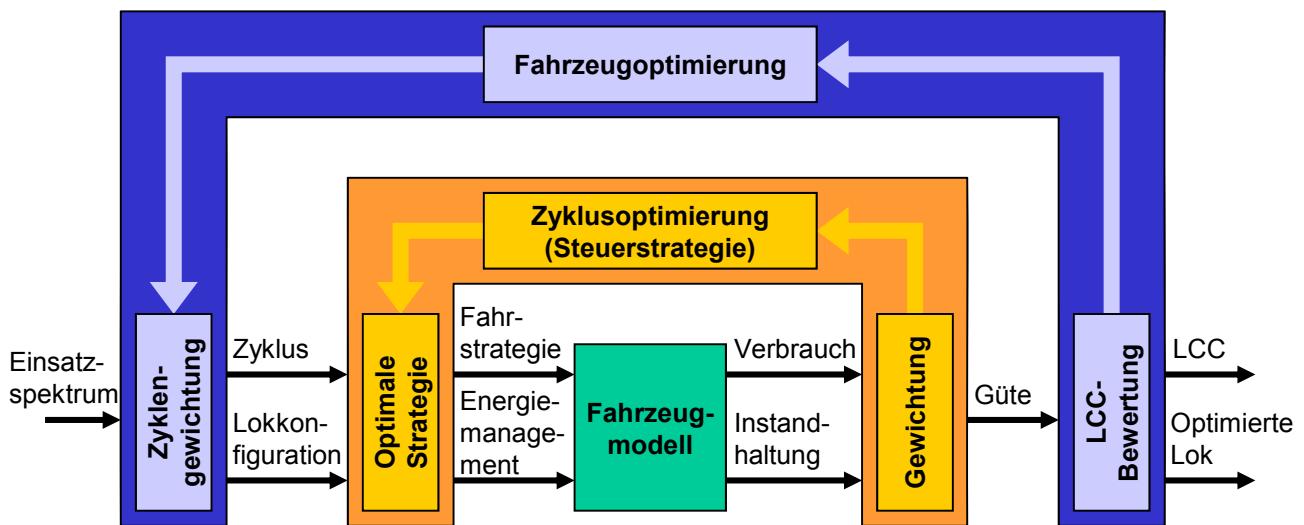


Abbildung 1-1: Schema Optimierungsstrategie

1.4.2 Fahrzeugsimulation

Für jede Kombination aus Fahrzeug, Strecke und Fahr- bzw. Betriebsstrategie müssen in der Fahrzeugsimulation Kenngrößen gewonnen werden, die eine Bewertung nach den Gesichtspunkten Verbrauch und Verschleiß zulassen. Das Fahrzeugmodell soll so aufgebaut sein, dass es den Stand der Technik von Verbrauchssimulationen erfüllt, über Datenblattangaben parametrierbar ist und die Einbeziehung von elektrischen Energiespeichern in die Berechnung zulässt.

Die Fahrzeugsimulation ersetzt somit die aufwändige Messung an teuren Prototypen in der Vorentwicklungsphase. Sie kann auch zur Generierung von Lastprofilen für die Auslegung von Antriebsstrangkomponenten genutzt werden. Weiterhin kann der Einfluss der verschiedenen Energiesenken⁴ in Abhängigkeit von der Fahraufgabe analysiert werden.

1.4.3 Optimierung der Betriebsstrategie

Neben der Fahrzeugkonfiguration und den Streckenparametern muss eine Betriebsstrategie für das Fahrzeug definiert werden, um eine Fahrzeit- und Verbrauchsberechnung durchführen zu können.

⁴ Als Energiesenken werden die am Gesamtenergieverbrauch beteiligten Anteile verschiedener für die Bewältigung der Fahraufgabe unter den gegebenen Randbedingungen notwendigen Verbraucher bezeichnet.

Die Betriebsstrategie einer dieselelektrischen Lokomotive mit Energiespeicher beinhaltet dabei die Fahrweise und die Speicherstrategie. Bei der Definition der Fahrweise wird der Fahrer mit seinen typischen Stellgrößen (Fahrhebel, Bremsen) abgebildet. Die Speicherstrategie beinhaltet die Steuerung des elektrischen Energiespeichers hinsichtlich der Energieaufnahme (Laden) und der Energieabgabe (Entladen). Der erhebliche Einfluss der Fahrweise auf die Kraftstoffeinsparung ist aus der Literatur bekannt ([MLMH08], [FMT02], [WLSK10]). Es soll deshalb untersucht werden, inwiefern es eine Wechselwirkung zwischen der optimalen Betriebsstrategie eines Speichers und der Fahrstrategie gibt.

Bei der Entwicklung der Fahrstrategie müssen die Anforderungen des Fahrplans und Komfortanforderungen der Passagiere (z. B. eine angenehme Bremsverzögerung) berücksichtigt werden. Die Speicherstrategie muss den zulässigen Werten für Lade- und Entladeströme bzw. der vorgegebenen Ausnutzung des Energieinhalts des Speichers Rechnung tragen. Ziel bei der Erstellung der Betriebsstrategie ist die Optimierung von Kraftstoffverbrauch und Fahrzeugverschleiß hinsichtlich eines gegebenen Szenarios (Fahrprofil, Fahrplan, Lokkonfiguration).

1.4.4 Optimierung der Fahrzeugkonfiguration

In der Bewertung von Angeboten auf Ausschreibungen nehmen die Lebenszykluskosten (LCC) eine herausragende Rolle ein [Kie09]. Wenn alle technischen und vertraglich-kommerziellen Anforderungen von den Anbietern erfüllt werden, sind diese das alleinige Bewertungskriterium. Die Lebenszykluskosten bestehen aus den Kosten für Beschaffung, Traktionsenergie und Instandhaltung des Fahrzeugs. Alle Kosten können als Absolutwerte für eine bestimmte Nutzungsdauer bestimmt werden. Die Anschaffungs- und Instandhaltungskosten werden mit Hilfe der Differenzkostenmethode bezüglich der Ausgangskonfiguration nur für die veränderten Komponenten (insbesondere den Speicher) bestimmt.

Die Kostenanteile werden nicht zwangsläufig gleich gewichtet. In der Regel wertet man die Beschaffungskosten überproportional hoch, weil sowohl Verbrauchskosten als auch Instandhaltungskosten bei projektierten Laufzeiten von 20 Jahren in der Zukunft anfallen und zum Zeitpunkt der Anschaffung nicht budgetiert werden müssen.

Die Fahrzeugkonfiguration kann vom Hersteller derart gestaltet werden, dass ein Optimum für ein bestimmtes Einsatzspektrum und eine Gewichtung der LCC-Faktoren erreicht wird. Weiterhin muss das Fahrzeug natürlich vom Betreiber gestellte Anforderungen erfüllen. Diese werden in der Ausschreibung spezifiziert. Beispielsweise sollen einige der für die Fahrdynamik relevanten Faktoren genannt werden, diese sind beispielsweise:

- die Höchstgeschwindigkeit (mit bestimmten Randbedingungen: Wagenzahl etc.),
- der Zugkraftüberschuss bei Höchstgeschwindigkeit,
- die Anfahrzugkraft,
- die Streckenfahrzeit und

- die Präferenz des Betreibers und der Kunden für bestimmte Funktionalitäten, wie z. B. den emissionslosen Halt.

Weiterhin gibt es Vorschriften, welche nicht direkt mit der Fahrdynamik verbunden sind. Dies sind z. B. die Richtlinien für die Verwendung zugelassener Werkstoffe und die Vorgaben für die Emissionen der Dieselmotoren.

1.5 Gliederung und Aufbau der Arbeit

Nach der Einleitung beginnt die Arbeit mit der Vorstellung des Fahrzeugs im Kapitel 2 „Die dieselektrische Traktion mit Energiespeicher“. Es werden die Charakteristik der Fahrzeuge und die Komponenten des dieselektrischen Antriebsstrangs vorgestellt. Im Vordergrund stehen dabei die Möglichkeiten und technischen Herausforderungen des Einsatzes elektrischer Energiespeicher auf dem Fahrzeug.

Das Kapitel 3 „Modellbildung und Simulation“ widmet sich dem Aufbau des selbsterstellten Simulationsprogramms. Auf die Evaluierung und Auswahl einer geeigneten Simulationsumgebung folgt die Beschreibung des Simulationsablaufs und der Abbildung der verschiedenen Elemente.

Das Kapitel 4 „Optimierung von Betriebsstrategien von Fahrzeugen“ diskutiert die Möglichkeiten zur Planung und Verbesserung des Fahrtablaufs und des Speicherbetriebs. Insbesondere werden regelbasierte Strategien mit und ohne Anpassung durch Vorausschau mit der dynamischen Programmierung nach BELLMANN verglichen, welche unter Einschränkung der Diskretisierung optimale Solltrajektorien erzeugt. Ein Schwerpunkt liegt auf der Kopplung der Optimierungsprobleme zur Verbesserung des Speichereinsatzes.

In Kapitel 5 „Optimierung der Motorsteuerung von Mehrmaschinenanlagen“ wird ein innovatives Antriebskonzept besprochen, welches die Möglichkeit zur Abschaltung einzelner Dieselmotorgeneratoren (Start/Stopp-Funktion) bietet. Nach einer kurzen Vorstellung der Komponenten und elektrischen Integration stehen verbrauchsoptimale Betriebsstrategien zur Steuerung des Systems im Vordergrund. Diese werden abhängig von der verwendeten Konfiguration und der Verfügbarkeit der Generatorabschaltung entworfen. Anschließend werden eine Möglichkeit der Integration in die Fahrzeugsteuerung und Wege zur weiteren Untersuchung des dynamischen Systemverhaltens aufgezeigt.

Das Kapitel 6 beschreibt die „Optimierung der Fahrzeugauslegung“ unter Variation charakteristischer Parameter für Fahrzeug und Energiespeicher. Die Zielfunktionen in Form der Kostenbestandteile der Lebenszykluskosten werden dargestellt. Weiterhin wird eine Sensitivitätsanalyse von Simulationsparametern durchgeführt, um Abhängigkeiten einzuschätzen und die Empfindlichkeit der Ergebnisse gegen Parameterveränderungen zu überprüfen. Die Aussagen werden nachfolgend zur Interpretation der Ergebnisse der ungerichteten Suche im Konfigurationsraum und einer Optimierung unter Einsatz der evolutionären Algorithmen benötigt. In Kapitel 7 „Zusammenfassung und Ausblick“ werden die Ergebnisse der Arbeit resümiert und weiterführende Untersuchungen angelegt.

2 Die dieselelektrische Traktion mit Energiespeicher

2.1 Einordnung

Bei Diesellokomotiven ist die Leistungsübertragung im Antriebsstrang ein kritischer Punkt, weil besonders beim Anfahren hohe Zugkräfte übertragen werden müssen. Diese Anforderung (hohes Moment bei Drehzahl Null) entspricht nicht der Drehmomentenkennlinie von Dieselmotoren, weshalb eine variable Übersetzung erforderlich ist. Weiterhin muss die Drehrichtungsumkehr für den Fahrtrichtungswechsel gewährleistet werden. Die rein mechanische Kraftübertragung hat sich, anders als bei Kraftfahrzeugen (Kfz) und Bussen, zur Erfüllung dieser Anforderungen als ungeeignet erwiesen. Aus diesem Grund sind moderne Diesellokomotiven heute mit hydraulischer oder elektrischer Kraftübertragung ausgestattet.

Die Frage des besseren Lokomotivkonzepts kann nicht allgemein beantwortet werden. Generell zeichnen sich der dieselhydraulische Antriebsstrang durch eine kompaktere Bauform und weniger Masse aus. Es werden weiterhin gute Wirkungsgrade im Volllastbereich erreicht. Negativ wirkt sich der höhere mechanische Unterhaltungsaufwand auf. Wenn die vorgeschriebenen Instandhaltungsmaßnahmen erfolgen, sind die Lokomotiven jedoch sehr zuverlässig. Die Frage, welches System den besseren Kraftstoffverbrauch über den gesamten Einsatzbereich aufweist, konnte bereits 1983 von TEICH zugunsten der Dieselelektrik überzeugend dargelegt werden [Tei83], während PÄTZOLD im Disput eine „gesamtwirtschaftliche Überlegenheit“ der dieselhydraulischen Lokomotiven ins Feld führt [Pae83].

Die dieselelektrischen Lokomotiven konnten in den letzten Jahren überproportional von Weiterentwicklung der elektrischen Antriebstechnik und der Leistungselektronik profitieren. Die heute überwiegend verwendeten Drehstromantriebsmaschinen sind wartungsfrei, innerhalb der Leistungsgrenzen beliebig stellbar und weisen in allen Antriebszuständen gute Wirkungsgrade auf. Das mögliche Gleichteilekonzept mit elektrischen Lokomotiven wurde zum Beispiel bei der TRAXX-Lokomotive konsequent umgesetzt [PMSD08].

Der Einsatz von Energiespeichern auf dieselelektrischen Lokomotiven bietet die Möglichkeit des Aufbaus eines seriellen Hybridsystems. Der Vorteil gegenüber Kraftfahrzeugen ist, dass die Antriebstechnik für diese Konfiguration bereits auf dem Fahrzeug integriert ist. Die Anbindung von elektrischen Speichern kann im Zwischenkreis erfolgen. Dieselhydraulische Fahrzeuge können dagegen mit hydropneumatischen Energiespeichern [Dis10] zu einem dieselhydraulischen Hybridsystem ausgebaut werden. Nachteil hierbei ist die geringe Effizienz der Rekuperation durch die hohen Speicherverluste. Deshalb wird untersucht, ob nicht auch elektrische Energiespeicher in die Konfiguration integriert werden können ([KSL09], [RIWK11]). Die entstehende Konfiguration entspricht der eines Parallelhybrids. Die Vorteile eines Parallelhybridfahrzeugs in der Kraftfahrzeugtechnik, das geringe Gewicht und niedrigere Integrationskosten, greifen hier jedoch nicht, weil die hydraulische Kraftübertragung nicht eingespart werden kann.

2.2 Referenzlokomotive und Zugkonfiguration

Als Referenz wird die Streckenlokomotive TRAXX P 160 DE, wie sie bei der LNVG eingesetzt werden, ausgewählt. Diese dieselelektrische Lokomotive bildet die Grundlage für die Untersuchung. Die technischen Daten sind in Tabelle 2-1 aufgeführt.

Tabelle 2-1: Ausgewählte technische Daten der TRAXX P 160 DE Typ LNVG ([LBJ+10], S. 100 ff.)

Daten	Angabe
Dieselmotor	MTU 16 V 4000 R 41 L
Nennleistung (Drehzahl)	2200 kW (1860 U/min)
Länge über Puffer	18,9 m
Generatortyp	Eigenbelüfteter Synchrongenerator mit Fremderregung
Generatorleistung (Nenndrehzahl)	2188 kW (1860 U/min)
Zwischenkreisspannung	variabel, 1170-1900 V
Bremswiderstand	2 x 800 kW
Dienstmasse	81,5 t

Die TRAXX DE ist mit Tatzlagerantrieb und reduzierter Höchstgeschwindigkeit auch im Güterverkehr im Einsatz (TRAXX F 140 DE). Prinzipiell ist der Antriebsstrang bei anderen dieselelektrischen Lokomotiven dieser Baugröße ähnlich. So weist z. B. die Siemens ER 20 einen gleichartigen Antriebsstrang auf [MFS03]. Grundsätzlich ergeben sich bei Streckenlokomotiven in dieser Leistungsklasse andere Anforderungen als zum Beispiel an Rangierlokomotiven oder schwere Güterzuglokomotiven. Das Grundprinzip der Leistungsübertragung ist jedoch ähnlich, weshalb viele Analogien hergestellt werden können. Als Wagen kommen im Regionalverkehr in Deutschland oft Doppelstockwagen der Fa. BT zum Einsatz, weswegen sie zur Bildung eines repräsentativen Zugverbands herangezogen werden. Der betrachtete Wagenzug soll aus der Lokomotive mit vier Mittelwagen und einem Steuerwagen bestehen. Die Daten der bei der LNVG und der DB eingesetzten Doppelstockwagen sind in Tabelle 2-2 angegeben.

Tabelle 2-2: Darstellung ausgewählter technischer Daten der Doppelstockwagen aus Görlitz [Typenschild]

Daten	Angabe
Sitzplätze Mittelwagen/Steuerwagen	121/54
Masse Mittelwagen/Steuerwagen (100 % belegt)	60 t/58 t
Länge Mittelwagen/Steuerwagen	26,8 m/27,3 m

2.3 Aufbau und Komponenten

2.3.1 Überblick und Energiefluss

Der Aufbau und die Komponenten des dieselelektrischen Antriebsstrangs der Lokomotive mit einer möglichen Anbindung von Energiespeichern soll anhand eines Energieflussdiagramms beschrieben werden (Abbildung 2-1). Zur Nachvollziehbarkeit ist das Hauptstromblockschaltbild für

die Komponenten im Anhang (Abbildung A-4) dargestellt. Grundsätzlich ist der Dieselmotor die Primärenergiequelle. Der Dieselmotor wandelt chemische Energie in mechanische Arbeit um. Am Abtrieb des Dieselmotors sind Hilfsmaschinen angeflanscht, welche einen Teil der Leistung aufnehmen. Der Großteil der mechanischen Arbeit wird über einen Drehstromgenerator in elektrische Arbeit gewandelt und in den Zwischenkreis eingespeist. Der von einem Kondensator gestützte Zwischenkreis bildet einen Leistungsknotenpunkt. Primär werden die Fahrmotoren versorgt, welche den Antrieb der Lokomotive über das Radsatzgetriebe und die Räder bewirken.

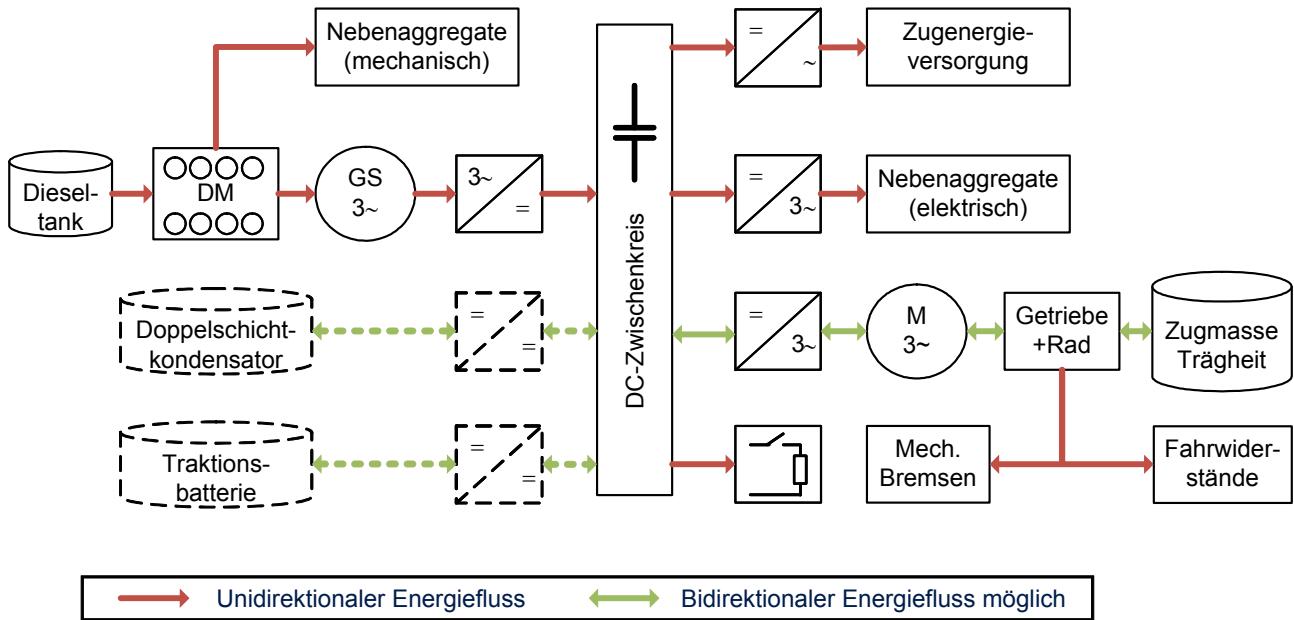


Abbildung 2-1: Energiefluss einer dieselelektrischen Lokomotive (Drehstromantriebstechnik)

Zum Bremsen des Zuges können die mechanischen Druckluftbremsen der Lokomotive und der Wagen genutzt werden. Bei Betriebsbremsungen wird heute jedoch das elektrische Bremsen bevorzugt, welches moderne dieselelektrische Lokomotiven beherrschen. Dabei können die Fahrmotoren im Generatorbetrieb über den bidirektionalen Pulswechselrichter Strom in den Zwischenkreis rückspeisen. Die Verteilung zwischen elektrischer und mechanischer Bremskraft wird über ein sogenanntes Bremsblending gesteuert.

Neben den Fahrmotoren müssen aus dem Zwischenkreis auch die Zugenergieversorgung und die Hilfsanlagen auf der Lokomotive versorgt werden. Bei einem zu hohen Spannungsniveau im Zwischenkreis, wie er beim regenerativen Bremsbetrieb auftreten kann, wird über den Bremswiderstand, dessen Leistungsaufnahme über einen Bremssteller regelbar ist, elektrische Arbeit dissipiert. In der dargestellten Konfiguration mit zusätzlichen elektrischen Energiespeichern kann die Energie jedoch auch gespeichert und bei Bedarf wieder abgegeben werden.

2.3.2 Dieselmotorgeneratorsatz

Primärenergieträger im dieselelektrischen Antriebsstrang sind fossile Brennstoffe, welche in einer oder mehreren Verbrennungskraftmaschinen (VKM) verbrannt werden und eine sehr hohe spezifische Energie aufweisen. Bei Lokomotiven kommen in der Regel Dieselmotoren zum Einsatz, was

in der auf den gesamten Arbeitsbereich gesehen höheren Effizienz gegenüber Ottomotoren und Gasturbinen begründet ist. Die Dieselmotoren sind mechanisch direkt mit den Generatoren verbunden und bilden einen Dieselmotorgeneratorsatz, im Folgenden Genset genannt. Als Generatoren kommen Drehstromgeneratoren zum Einsatz. Typischerweise sind dies fremderregte Synchronmaschinen oder Asynchronmaschinen. Aufgrund der Weiterentwicklung in der Permanentmagnettechnologie und dem Fokus auf eine verlustarme Energiewandlung ist heute auch der Einsatz von permanenterregten Synchrongeneratoren möglich, die den hohen Wirkungsgrad der Synchronmaschinen mit konventioneller elektrischer Erregung übertreffen [Neu08].

2.3.3 Zwischenkreis und Umrichtertechnik

Wie in Abschnitt 2.1 einleitend erwähnt, werden dieselektrische Lokomotiven heute in der Regel mit Drehstromantriebstechnik ausgerüstet. Die Referenzlok weist eine generatordrehzahlabhängige Zwischenkreisspannung auf, wobei die Gleichrichtung über eine ungesteuerte B6-Gleichrichterbrücke erfolgt. Hierbei ergeben sich Restriktionen in der Abstimmung mit den Umrichtern für Fahrmotoren und Nebenaggregate, wenn diese für den Betrieb ein bestimmtes Spannungsniveau benötigen. Mit DC/DC-Wandlern oder gesteuerten Brücken sind heute auch Topologien mit unabhängig von der Genset-Drehzahl konstanter Zwischenkreisspannung möglich.

2.3.4 Fahrmotoren und Getriebe

Als Fahrmotoren kommen heute vorwiegend Asynchronmotoren zum Einsatz. Diese Motoren sind robust, wartungsarm und preisgünstig. Über Pulswechselrichter können im zulässigen Arbeitsbereich des Fahrmotors nahezu beliebige Lastpunkte angesteuert werden. Eine Besonderheit der Lokomotive TRAXX DE ist, dass die Drehgestelle und Fahrmotoren mit denen der elektrischen TRAXX-Lokomotiven identisch sind ([LBJ+10], S. 33). Damit sind motorseitig bis zu 5,6 MW Rekuperationsleistung möglich. Auch hier gibt es die Tendenz zum verstärkten Einsatz von permanenterregten Synchronmaschinen. Abgesehen von höheren Investitionskosten sind hier Sicherungsvorkehrungen zu treffen, weil die Erregung nicht abgeschaltet werden kann und somit im Fehlerfall bei fahrendem Zug hohe Spannungen im Fahrmotor induziert werden.

2.3.5 Nebenaggregate

Als Nebenaggregate oder Hilfseinrichtungen werden Anlagen bezeichnet, die nicht für das Erzeugen der Zugkraft verantwortlich, sondern für die Abdeckung der betriebssichereren und betriebsgerechten Funktionen eines Schienenfahrzeugs notwendig sind [Fei09]. Die Hilfseinrichtungen können zum einen in Hilfsmaschinen, die für den Motorlauf notwendig sind, und zum anderen in Hilfsanlagen, die für den Zugbetrieb notwendig sind, unterteilt werden. Eine Übersicht wird in Tabelle 2-3 gegeben.

Die Hilfsmaschinen sind typischerweise mechanisch mit dem Dieselmotor gekoppelt. Die Hilfsmaschinenverluste sind in den Wirkungsgradkennfeldern der Dieselmotorhersteller berücksichtigt, da diese bei der Messung durch den Dieselmotor betrieben werden müssen. Zu beachten ist jedoch, dass zwar die Pumpen für die Hoch- und Niedertemperaturkreisläufe berücksichtigt sind, nicht jedoch die für das Kühlungssystem notwendige Lüfterleistung, die oftmals über Hydrostatikpumpen

aufgebracht wird [BSI02]. Die benötigte Kühlleistung ist von der Kühlerauslegung abhängig und fahrzeugspezifisch. Der Bedarf ist nicht zu unterschätzen und kann für Lokomotivmotoren bei Vollast über 100 kW betragen.

Im Gegensatz dazu sind die Hilfsanlagen bei dieselelektrischen Fahrzeugen elektrisch betrieben. Die Versorgung der Hilfsanlagen der Lokomotive wird über die Hilfsbetriebeumrichter gewährleistet. Dieser kann auf der TRAXX DE 130 kVA bereitstellen, die mittlere Leistungsaufnahme ist jedoch wesentlich geringer. Die Versorgung der Zugsammelschiene wird über einen eigenen Wechselrichter gewährleistet, der auf maximal 480 kVA Leistung ausgelegt ist ([Fei09], S. 194). Hauptverbraucher der Wagen sind die Heizung und die Klimaanlage. Je nach Umgebungsbedingungen werden bis zu 67 kVA pro Doppelstockwagen permanent verbraucht [Sch11d]. Die Leistungsaufnahme der Zugsammelschiene kann daher die Traktionsleistung vermindern und die Fahrdynamik beeinflussen.

Tabelle 2-3: Übersicht über die Nebenaggregate

Hilfsmaschinen (mechanisch gekoppelt)	Hilfsanlagen (über Hilfsbetriebeumrichter)
Kraftstoffpumpe Niederdruck	Batterie Erhaltungsladung (Starter, Zugheizung, Steuergeräte etc.)
Kraftstoffpumpe Common Rail	Lüfter Fahrmotoren
Pumpe Niedertemperaturkreislauf	Kompressor der Druckluftbremse
Pumpe Hochtemperaturkreislauf	Scheinwerfer
Hydrostatikpumpe (Lüfter Kühlturn)	Kühlerlüfter Bremswiderstand
Schmierölpumpe	Klimaanlage Fahrer
	Heizzungen Innenraum und Frontscheibe
	Stromrichterkühlung (Pumpe, Innenlüfter)
	Zugenergieversorgung ⁵

2.4 Messfahrt auf der Strecke Hamburg - Cuxhaven

2.4.1 Ziele

Das Ziel der Messfahrt ist zum einen die Validierung und Parametrierung der erstellten Programme zur Fahrtberechnung. Zum anderen kann über die Versuche ein Einblick in die Umsetzung der Steuerfunktionen gewonnen werden. So können z. B. die Dieselmotorsteuerung und das Einschaltverhalten von Hilfsmaschinen und Hilfsanlagen überprüft werden. Wenn relevante und abbildbare Funktionen fehlen, sollen diese wenn möglich in der Simulation umgesetzt werden.

⁵ Die Zugenergieversorgung (ZEV) wird über eigenen Zugenergieversorgungswechselrichter sichergestellt.

2.4.2 Betriebscharakteristik

Die Versuche fanden auf der Strecke Hamburg – Cuxhaven (HH-CXH) statt, auf welcher der Betreiber Metronom von der LNVG bereitgestellte Lokomotiven TRAXX P 160 DE (BR 246) eingesetzt. Diese verkehren in der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Konfiguration. Die Strecke ist 117,2 km lang und weitestgehend flach. Der Zug fährt zwölf Verkehrshalte an. Damit beträgt der Stoppabstand 10 Kilometer. Der Zugbetrieb ist nach Tabelle 2-4 dem Regionalexpress zuzuordnen.

Tabelle 2-4: Typische Kenngrößen für Zugverbindungen [eigene Recherchen, siehe Tabelle A-2]

Typ	Stoppfrequenz [Stopp/min]	Stoppabstand [km]	Definition
S-Bahn	> 0,2 (typisch 0,3 bis 1)	< 5 (typisch: 1 bis 2)	Verkehr in Ballungsräumen mit hoher Haltestellendichte
Regionalbahn	0,15 bis 0,25	3 bis 7	in der Regel Halt an allen aktiven Haltepunkten (keine feste Definition)
Regionalexpress	0,05 bis 0,15	7 bis 20	Halt nur an ausgewählten Haltepunkten (keine feste Definition)

2.4.3 Versuchsdurchführung

Es wurden an vier Tagen jeweils zwei Umläufe begleitet. Damit stehen pro Fahrtrichtung acht Messungen zur Verfügung. Die Aufzeichnungen erfolgten über den fahrzeuginternen Datenbus (MVB – engl. Multi Vehicle Bus). Die aufgezeichneten Größen umfassen damit nicht nur Sensorsignale, sondern auch bereits verarbeitete Daten, die aus den Messdaten über physikalische Beziehungen und Modelle auf Basis der Sensorsignale generiert werden.

Die Messfahrten fanden im regulären Fahrbetrieb mit Passagieren statt. Es wurden drei verschiedene Zugpaare gemessen. Dem Fahrer wurden keine Anweisungen bezüglich der Fahrweise gegeben. An Bord befanden sich immer zwei Personen, welche die Messwertaufzeichnung überwachten und zusätzliche Informationen wie unplanmäßige Halte und die Passagierzahlen erfassten. Es wurden 64 Größen aufgezeichnet, welche die folgenden Bereiche umfassen:

- die Zugbewegung (Geschwindigkeit, Beschleunigung, GPS-Signale),
- die Zugsteuerung (Führerbremseventil, Zugkrafthebel),
- den Gensetbetrieb (Generatorleistung, Erregerstrom, Ladedruck, Zwischenkreisspannung),
- die Fahrmotoren (Zugkraft),
- die Leistungsaufnahme von Zugenergieversorgung und Hilfsbetriebeumrichter,
- die Bremsen (Druck Hauptluftbehälter, Bremsdruck, Leistungsaufnahme des Bremswiderstands, Zustand des Kompressors) und
- den Tankfüllstand.

2.4.4 Datenverarbeitung

Die Verarbeitung der Daten erfolgt mit selbsterstellten Auswertealgorithmen. Diese umfassen die Möglichkeiten der Anzeige mehrerer Signale einer Fahrt über Zeit oder Weg, die Überlagerung eines bestimmten Signals verschiedener Fahrten, die statistische Untersuchung der Verteilung und des Verhaltens in bestimmten Fahrzuständen und die Darstellung der Abhängigkeit zwischen zwei Messgrößen. Ein Beispiel für die vergleichende Auswertung von Fahrprofilen ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Die Verläufe machen insbesondere die häufige Anwendung des Fahrregimes Ausrollen und das seltene Auftreten von betriebsbedingten Störungen (z. B. eines unplanmäßigen Signalhalts) deutlich.

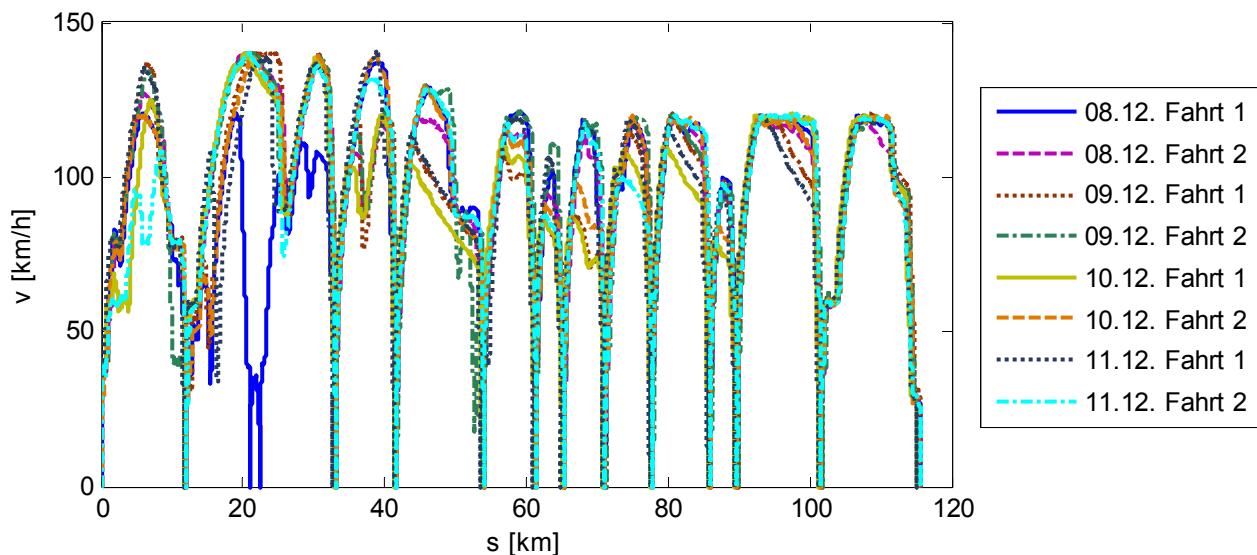


Abbildung 2-2: Vergleich verschiedener Fahrprofile von Hamburg nach Cuxhaven

2.5 Energiefluss der dieselelektrischen Lokomotive

2.5.1 Erstellung eines Energieflussdiagramms

Für die Analyse möglicher Einsparmaßnahmen hinsichtlich ihres Potentials ist das Energieflussdiagramm (auch Sankey-Diagramm genannt) ein geeignetes Hilfsmittel. Das Sankey-Diagramm bildet die kumulierten Leistungsgrößen P über einen Zeitraum t_0 bis t_1 ab:

$$W = \int_{t_0}^{t_1} P dt. \quad (2.1)$$

In dem in Abbildung 2-3 abgebildeten Sankey-Diagramm sind als Zusatzinformationen Energiespeicher und Energiewandler in separaten Farben dargestellt.

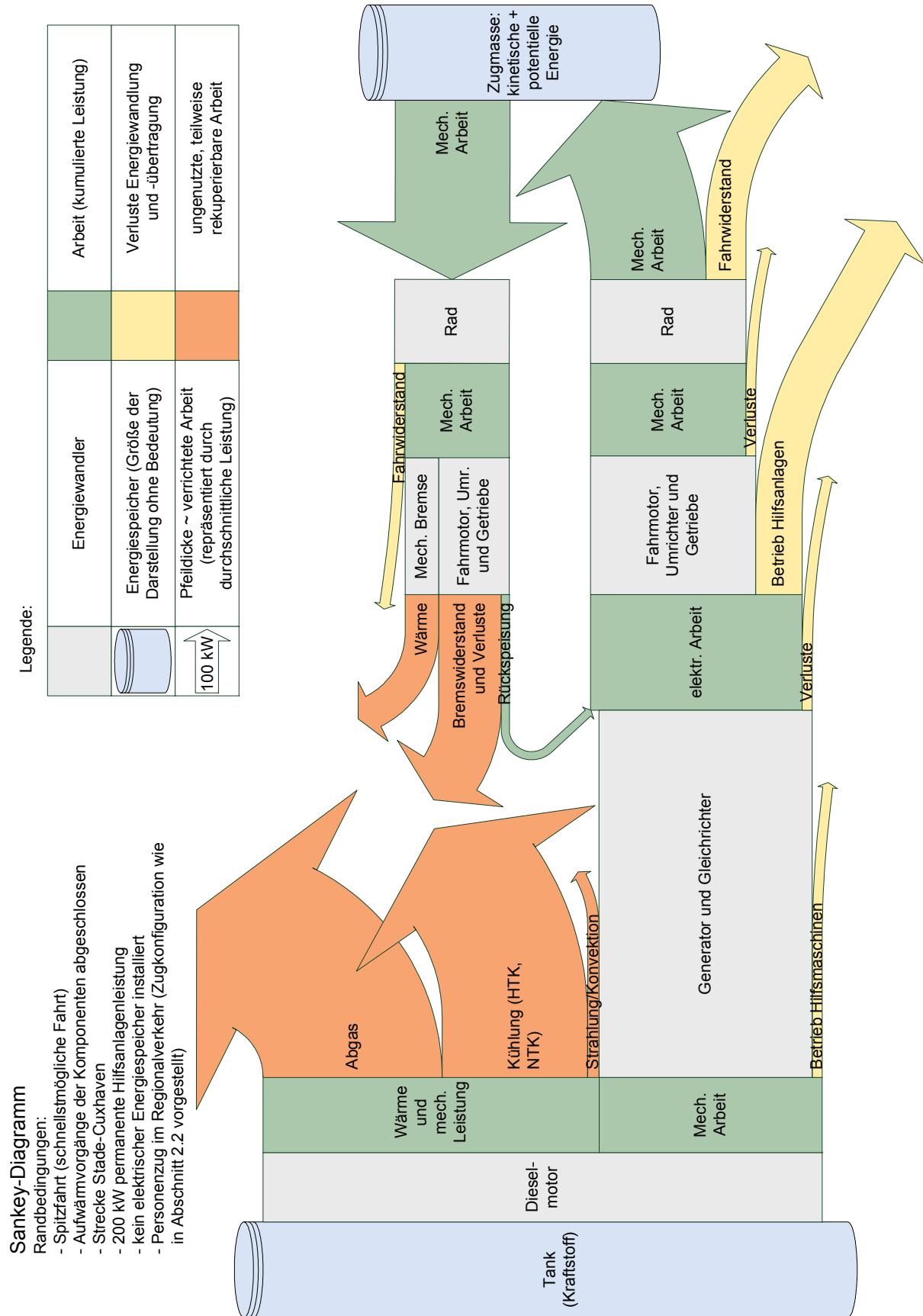


Abbildung 2-3: Energieflussdiagramm der dieselelektrischen Lokomotive (Aufteilung Dieselmotorverluste angelehnt an [Spe90], S. 45)

Im Ausgangssystem sind bereits Energiespeicher vorhanden, die potentielle und kinetische Energie speichern. Die Speicherwirkung ergibt sich durch die Masse und das Trägheitsmoment der Lokomotive und des Wagenzugs. Die dabei umgesetzten Energiemengen sind stark streckenabhängig und im Einzelfall nur durch die Simulation zu überprüfen. Einflussfaktoren für den Speicherumsatz sind u. a. die mittlere Steigung, der mittlere Abstand zwischen den Haltepunkten und die Streckenhöchstgeschwindigkeit.

Bei Annahme eines gleichen Anfangs- und Endzustands der Lokomotive und ihrer Komponenten im Depot oder der Endhaltestelle (d. h. gleiche Höhe, Fahrzeug steht) wird im Energiespeicher „Fahrzeug“ über das gesamte Lastspiel gesehen keine Energie absorbiert. Die primäre Energiequelle des Fahrzeugs ist somit der Kraftstoffvorrat im Tank.

2.5.2 Auswertung und Schlussfolgerungen

Effizienzsteigernde Maßnahmen an Komponenten

Alle Umwandlungsstufen sind verlustbehaftet. Die Reduzierung der Umwandlungsverluste muss auf Komponentenebene erwirkt werden. Der Fahrzeugherrsteller kann bei der Zusammenstellung der Komponenten darauf achten, dass in relevanten Betriebssituationen ein möglichst hoher Gesamtwirkungsgrad erreicht wird. Durch Abstimmung mit dem Zulieferer kann das Potential für weitere Verbesserungen so ausgenutzt werden, dass die Gesamteffizienz des Fahrzeugs wesentlich verbessert wird.

Reduzierung der Fahrwiderstände

Die Reduktion der Fahrwiderstände gehört ebenfalls zu den effizienzsteigernden Maßnahmen. Die Verbesserung des Luftwiderstands der Fahrzeuge kann insbesondere für Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge erhebliche Einsparungen bringen. Es wird von Energieeinsparungen von bis zu neun Prozent berichtet [MOS10]. Positiv über den gesamten Geschwindigkeitsbereich wirken sich Verbesserungen im Grundwiderstand aus, die sich unter anderem durch bessere Achslagerung erreichen lassen [Wen03].

Senkung des Nebenaggregatebedarfs

Lange wurden die Nebenaggregate als nebensächlicher Bestandteil bei der Betrachtung des Energiebedarfs von Fahrzeugen betrachtet, da der auftretende Leistungsbedarf weit unter der Maximalleistung der Antriebsmaschinen liegt. Die Bedeutung der Energieaufnahme der Nebenverbraucher, die teilweise kontinuierlich laufen, wird heute in der Fahrzeugentwicklung allgemein als wesentlicher Bestandteil erkannt. In einer Veröffentlichung von KLAUSNER wurde die Nebenaggregateleistung bei Straßenbahnen als wesentlicher Verbraucher identifiziert [KL08]. Durch die Abhängigkeit der Nebenaggregateleistung von der Umgebungstemperatur kann es zu erheblichen Unterschieden in der Energiebilanz kommen. Ein beträchtliches Potential besteht dabei im Einsatz energieeffizienter Nebenaggregate und deren Steuerung. So kann etwa durch eine effiziente Regelung von Lüftern eine unnötige Leistungsaufnahme verhindert werden. Zur besseren Nutzung der regenerativen

Bremsung sollten wenn möglich alle Nebenverbraucher speziell in diesen Phasen eingeschalten (z. B. der Bremskompressor) bzw. mit höherer Leistung betrieben werden (z. B. Heizung und Klimatisierung). Dies entlastet das Genset in den anderen Fahrphasen und bietet Einsparpotentiale von bis zu zehn Prozent ([Wit11], [SW10b]).

Abwärmenutzung

Der Dieselmotor als erster Energiewandler kann nur ca. 40 Prozent der im Dieselkraftstoff gespeicherten Energiemenge in mechanische Arbeit umwandeln [Ber07]. Diese Verluste sind prinzipbedingt und aktuelle Motoren sind bereits hoch entwickelt. Somit ist das Potential für weitere Wirkungsgradsteigerungen des Dieselmotors durch innermotorische Maßnahmen begrenzt und nur mit hohem Aufwand zu realisieren. Weiterhin verbessern die stetig steigenden Anforderungen der Abgasgesetzgebung zwar die Emissionen der Motoren [EG04], gleichzeitig sind die dafür notwendigen Maßnahmen jedoch konträr zur verbrauchsoptimalen Auslegung und Abstimmung der Motoren. Entwicklungen auf diesem Gebiet liegen in der Verantwortung der Hersteller und Entwickler der Dieselmotoren, weshalb diese hier nicht weiter erläutert werden.

Von Seiten der Fahrzeugherrsteller kann versucht werden, die Verlustwärme in den Kühlkreisläufen des Fahrzeugs und die thermische und mechanischen Energie des Abgases zu nutzen. Die Nutzung der Abwärme in den Kühlkreisläufen ist dabei durch das geringe Temperaturniveau und die damit verbundene geringe Exergie⁶ begrenzt. Sie wird vorwiegend für Klimatisierungsaufgaben (z. B. das Heizen der Fahrerkabine) genutzt. Vielversprechend dagegen ist die Rückgewinnung der im Abgas gespeicherten Energie. Diese kann durch Maßnahmen, die auf die direkte mechanische Nutzung zielen, wie z. B. durch Turbinen mit direkter mechanischer Kopplung zur Kurbelwelle [KM06] oder zur Gewinnung elektrischer Energie [Hop04], oder Systemen, die auf der Nutzung der Abgaswärme basieren, erfolgen. Erstere haben den Nachteil, dass sich durch die Drosselwirkung gleichzeitig der Abgasgegendruck erhöht, was den effektiven Mitteldruck des Motors und damit die Leistungsfähigkeit verringert. Dieser Effekt tritt bei Abgaswärmerückgewinnungssystemen weniger stark auf. Auf diesem Gebiet konkurrieren die Systeme unter Nutzung des Dampfkreisprozesses ([Ber07], [MAN08]) mit thermoelektrischen Generatoren (TEG) [BKE01]. Nichtsdestotrotz ist jedoch auch bei diesen Systemen eine Drosselwirkung durch den Abgaswärmetauscher zu berücksichtigen.

Bei einer Untersuchung des Systems der Fa. Voith, welches den Dampfkreisprozess nutzt, wurde für reale Fahrzyklen von einer Kraftstoffeinsparung von bis zu fünf Prozent berichtet [KSL09]. Für TEG-Systeme wird im Rahmen des HiTEG-Projekts bei der Entwicklung eines Systems mit hocheffizienten TEG-Modulen eine ähnliche Verbrauchsreduktion angestrebt [SB10]. Die Systeme sind hochkomplex und zuverlässige Simulationsergebnisse können nur bei vollständiger Darstellung der thermodynamischen Zusammenhänge und der Steuerung der Systeme gewonnen werden. Die Abwärmerückgewinnungssysteme werden im Weiteren nicht betrachtet, jedoch kann die Zugfahrt-

⁶ Exergie bezeichnet den Anteil der Gesamtenergie eines Systems oder Stoffstroms, der Arbeit verrichten kann, wenn er in das thermodynamische Gleichgewicht mit seiner Umgebung gebracht wird [GF07].

und Verbrauchssimulation mit der einhergehenden Bestimmung der Motorlast für die Gewinnung von Eingangsgrößen für die Simulation dieser Systeme genutzt werden. Dieser Berechnungsprozess wird in der Diplomarbeit von ZHOU dargestellt [Zho09].

Verbrauchsreduktion durch Speichereinsatz

Energiespeicher tragen zur verstärkten Nutzbarmachung von Bremsarbeit bei (Rekuperation). Die zwischengespeicherte Energie wird in anderen Fahrphasen abgegeben und entlastet das Genset. Auf Fahrzeugen kann der Speicher weiterhin zur Verstärkung der Leistungsanforderung genutzt werden, die zu einer Verkleinerung des Gensets führen (Downsizing) und den relativen Anteil des Leerlaufverbrauchs durch eine Lastpunktanhebung wesentlich verringern kann. Bei Hafenmobilkränen, die ebenfalls einen seriellen dieselelektrischen Antriebsstrang aufweisen, wurde dieses Konzept in einer Studie untersucht, wobei erhebliche Einsparpotentiale aufgezeigt werden konnten [SBT+10]. Die große benötigte Antriebsleistung über einen langen Zeitraum und der damit notwendige Einsatz von großen Batteriespeichern kann diesem Ziel bei Streckenlokomotiven entgegenstehen. Ein weiteres Betriebsziel kann im emissionsfreien Halt im Bahnhof oder gar dem emissionsfreien Befahren bestimmter Streckenabschnitte (z. B. ein für Dieselfahrzeuge nicht freigegebener Tunnel) liegen. Dies geht nicht unbedingt mit einer Kraftstoffeinsparung einher, da die Energie von einem verlustbehafteten Speicher zwischengespeichert werden muss. Je nachdem wie groß der Anteil der Rekuperation an der Ladung des Speichers ist, kann sich sogar ein Mehrverbrauch einstellen [Zho10]. Die verschiedenen Speichermöglichkeiten und deren Grenzen werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

2.6 Energiespeicher für dieselelektrische Fahrzeuge

Die Masse und Trägheit des Zuges speichert kinetische und potentielle Energie. Bei vorgegebenem Fahrprofil ist die Steuerung der Ladung und Entladung dieses Speichers jedoch nicht möglich, was zur Umwandlung der mechanischen Energie in unerwünschte Abwärme führt. Das Fahrzeug soll um ein Speichersystem ergänzt werden, dessen Ladung und Entladung zumindest in Grenzen frei gestellt werden kann. Im Folgenden werden die Eigenschaften verschiedener Speichersysteme diskutiert, was eine Bewertung hinsichtlich ihrer Eignung für dieselelektrische Lokomotiven ermöglicht.

2.6.1 Allgemeine Anforderungen an Traktionsenergiespeicher

Vor einer Grobauswahl der Speichersysteme sollen zuerst die allgemein gültigen Anforderungen an die Energiespeichersysteme genannt werden, um die Speicher qualitativ bewerten zu können:

- Hohe spezifische gravimetrische Energie und Energiedichte,
- hohe spezifische gravimetrische Leistung und Leistungsdichte,
- dem Anwendungsprofil angepasste typische Lade- und Entladezeiten,
- hohe kalendarische Lebensdauer und ausreichende Zyklusfestigkeit,

- weitestgehend freie Steuerbarkeit der Ladung und Entladung,
- gute Lade- und Entladewirkungsgrade zur effektiven Energienutzung,
- Gewährung einer ausreichenden Sicherheit auch bei hohen mechanischen Belastungen,
- möglichst großer zulässiger Temperaturbereich bei Erhalt der nominellen Eigenschaften,
- geringer Anteil umweltbelastender Materialien und gute Recyclingfähigkeit,
- hoher Grad der Verfügbarkeit (Zuverlässigkeit),
- möglichst geringe Selbstentladung
- ausreichende Marktreife und
- geringe Kosten.

Alle diese Kriterien sind von hoher Relevanz, ein deutliches Abweichen eines Speichersystems in einem dieser Punkte kann zum Ausschluss führen.

2.6.2 Betriebszielspezifische Anforderungen

Dass die Gewichtung und die Ausprägung der grundsätzlichen Anforderungen eines Speichers je nach Betriebsziel unterschiedlich sein können, soll in folgender Gegenüberstellung deutlich werden (Tabelle 2-5). Qualitativ werden die Anforderungen der Speicher in ausgewählten Punkten für drei Betriebsarten unterschieden. Eine quantitative Bewertung ist nur bei Betrachtung eines spezifizierten Einsatzprofils möglich. Es werden nur die Anforderungspunkte aus Abschnitt 2.6.1 untersucht, bei denen je nach Betriebsziel unterschiedliche Gewichtung festgestellt werden kann. Dabei wird im ersten Szenario das abschnittsweise rein elektrische Fahren betrachtet, wie es beispielsweise bei Dieselfahrzeugen in einem Tiefbahnhof gefordert sein kann oder bei elektrischen Güterzuglokomotiven für die Fahrt auf nichtelektrifizierten Anschlussgleisen benötigt wird.

Ein zweites Szenario beschreibt die Verfestigung der Lastanforderungen bei Rangierlokomotiven, welches mit der Start/Stopp-Funktionalität und einer teilweise erheblichen Verkleinerung des Gensets einhergeht [OD09]. Das dritte Szenario stellt die in dieser Arbeit vorrangig untersuchte Rekuperation von Bremsarbeit dar. Prinzipiell sind noch weitere Betriebsziele für Speicher ableitbar, insbesondere wenn man das Verfolgen kombinierter Betriebsziele zulässt. Die verschiedene Auslegung und Gewichtung der allgemeinen Anforderungen lässt erkennen, dass der für die Anwendung optimale Speichertyp mit dem Betriebsziel variiert.

2.6.3 Vorevaluation der Speichertechnologien

Aus den verschiedenen physikalischen Domänen lassen sich viele Speichertechnologien ableiten, die für die Zwischenspeicherung von elektrischer Energie zumindest theoretisch in Betracht kommen können (Abbildung 2-4). Im Folgenden werden die relevanten Energiespeicher für dieselelektrische Lokomotiven ausgewählt. Dabei soll im ersten Schritt ein Ausschlussverfahren zum Einsatz kommen, bei dem die Technologien aufgrund der in Abschnitt 2.6.2 ausgearbeiteten einsatzkritischen Eigenschaften für das Betriebsziel Rekuperation von Bremsarbeit bei Triebfahrzeugen im Personenverkehr bewertet werden.

Tabelle 2-5: Bewertung der Anforderungen an Energiespeicher in Abhängigkeit von ausgewählten Betriebszielen

Kriterium	Abschnittsweise rein elektrisches Fahren	Homogenisierung der Lastanforderungen bei einer Rangierlok	Rekuperation von Bremsarbeit im Personenverkehr
spezifische Energie	kritisch, da begrenzte Zusatzmasse	weniger kritisch, da Ersatz von Ballast durch Batteriemasse	kritisch, da begrenzte Zusatzmasse und ggf. eingeschränkter Nutzungsbereich des Speichers
Ladezeit	unkritisch, oft lange Ladephasen zwischen den Abschnitten	unkritisch, lange Ladephasen (typisch >15 min) [OD09]	kritisch, da kurze Bremsphasen (typisch <2 min) ⁷
Entladezeit	weniger kritisch (typisch <10 min), ggf. hohe Leistungsspitzen ⁸	weniger kritisch (typisch >30 min) [OD09]	weniger kritisch (typ. <10 min)
Zuverlässigkeit	kritisch, wenn Lokomotive ohne Genset oder Dieselbetrieb auf dem Abschnitt verboten	weniger kritisch, Verlust der Leistungsfähigkeit, eingeschränkter Betrieb möglich	weniger kritisch, Verlust der Einsparung
Zyklenfähigkeit ⁹	weniger kritisch, ca. 10.000	weniger kritisch, ca. 10.000	kritisch, ca. 150.000
Kosten	kritisch, bei reinen Elektrolokomotiven wahrscheinlich Kompensation eines zusätzlichen Gensets	kritisch, nur Einsparung durch Downsizing und den verminderten Leerlaufverbrauch der Gensets	weniger kritisch, Amortisierung durch Rekuperation muss jedoch nachgewiesen werden

Naheliegend für die Speicherung der elektrischen Bremsarbeit im Zwischenkreis sind elektrische oder elektromagnetische Energiespeicher. Klassische Kondensatoren speichern die Energie im elektrischen Feld, wobei jedoch Ladezeiten mit weit unter einer Sekunde erheblich unter typischen Rekuperationszeiten in Bremsvorgängen liegen. Doppelschichtkondensatoren als elektrochemische Energiespeicher zeichnen sich durch eine wesentlich größere Speicherfähigkeit aus und sind für Schienenfahrzeuge verfügbar ([SKP07], [Mei08]). Sie weisen eine hohe spezifische Energie auf und können bei realistischen Ladeströmen Entladedauern von bis zu zehn Sekunden erreichen [Köt02]. Die hohe Zyklenfestigkeit, die einfache Handhabung und die gute Skalierbarkeit sind weitere positive Eigenschaften. Supraleitende Spulen, welche die Energie im Magnetfeld speichern, müssen mit flüssigem Stickstoff oder Helium aufwändig gekühlt werden [LG05]. Die damit verbundenen ho-

⁷ Annahme: Bremsen aus bis zu 160 km/h bei einer Verzögerung von 0,4 bis 0,6 m/s²

⁸ Annahme: nur kleinere Fahrabschnitte können ohne Nachladung überbrückt werden

⁹ Annahme: Lebensdauer des Speichers fünf Jahre, 320 Arbeitstage pro Jahr, sechs Zyklen pro Tag (Betriebsziel 1 und 2), 100 Zyklen pro Tag (Betriebsziel 3).

hen Kosten und die hohe Systemkomplexität verhindern den Durchbruch dieses Speichertyps [Kha07].

Bei den mechanischen Energiewandlern gibt es zwei Grundprinzipien der Energiespeicherung. Potentielle Energie kann in mechanischen Federn, pneumatischen bzw. hydropneumatischen Druckspeichern und in Massen (z. B. Ausgleichsmassen) gespeichert werden. Die spezifische Energie dieser Speichersysteme ist mit deutlich unter einer Wh/kg jedoch sehr schlecht, was in der mas- sekritischen Anwendung auf Fahrzeugen, bei der durch zusätzliche Masse zum einen die Verluste durch Fahrwiderstände gesteigert und gleichzeitig der Speicherbedarf erhöht wird, kritisch ist ([Mar08], [Dis10]).

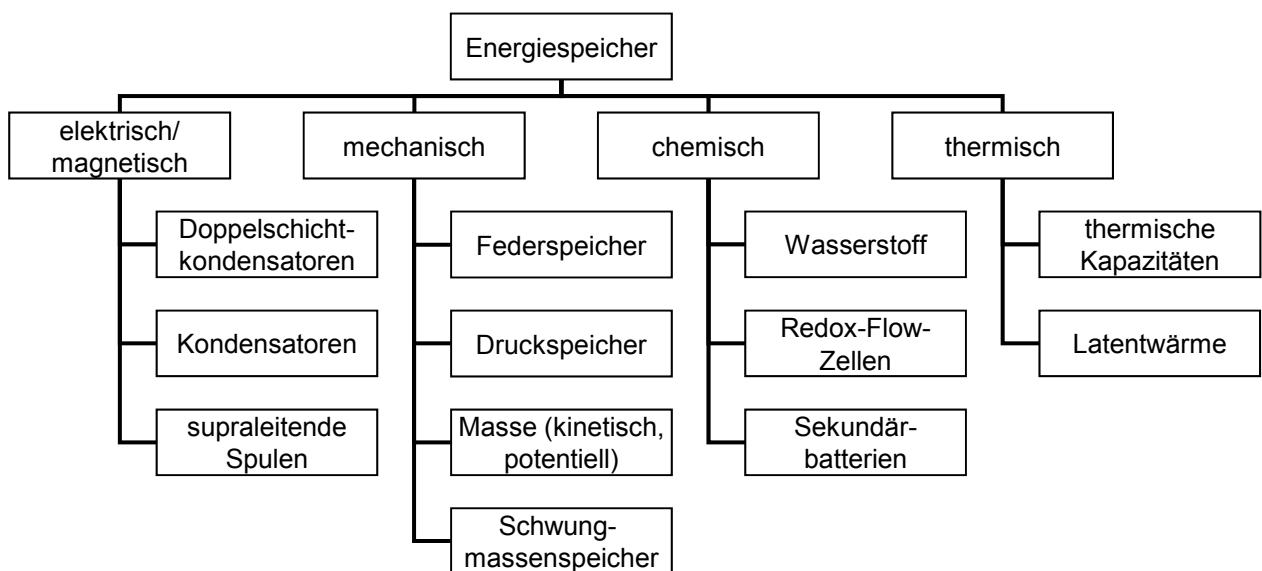


Abbildung 2-4: Übersicht über Energiespeichertechnologien

In der Gruppe der kinetischen Energiespeicher kommen Schwungmassenspeicher zum Einsatz. Deren spezifische Energie konnte durch die Steigerung der Drehzahlen erheblich erhöht werden und bewegt sich im Bereich von Doppelschichtkondensatoren ([Fly10], [FES10]). Jedoch ist es unklar, ob die hohen Anforderungen an die mechanische Belastbarkeit des Speichers in jedem Fall erfüllt werden können. Der hohe Aufwand für die Konstruktion eines sicheren Systems mit Berstschutz und sicherer Lagerung führt dazu, dass das System für Fahrzeuge derzeit eher in Nischenanwendungen (z. B. der Formel 1) bzw. als stationärer Energiespeicher in DC-Netzen für Straßenbahnen in Erscheinung getreten ist [Ros06]. Weiterhin sind solche Systeme schlechter skalierbar als Doppelschichtkondensatoren, da die spezifische Energie eines großen Moduls höher als bei mehreren kleinen Modulen ist ([FES10], S. 35).

Thermische Energiespeicher zeichnen sich durch eine sehr hohe spezifische Energie aus. So lässt sich beispielsweise durch Speicherung von thermischer Energie in Wasser bei einer Differenztemperatur von 100 K circa eintausendmal mehr Energie als in einer Lithium-Ionen-Batterie mit vergleichbarer Masse speichern.¹⁰ Auch die im Phasenübergang speicherbare Energie ist beträchtlich,

¹⁰ Die spezifische Wärmekapazität von Wasser beträgt 4,187 kJ/(kg·K).

so kann Aluminium beim Phasenübergang von fest zu flüssig ca. 800 kWh/kg freisetzen.¹¹ Die Speicherung der kompletten Arbeit eines Bremsvorgangs wäre mit einem solchen Speicher auf engstem Raum möglich. Aufgrund der geringen Effizienz bei der Rückwandlung in elektrische Energie, den hohen Investitionskosten und dem hohen Bauraumbedarf für Anlagen zur Umwandlung der thermischen Energie in elektrische Energie kann die thermische Speicherung der über elektrisches Bremsen gewonnenen Rekuperationsenergie nur in Kombination mit der Abwärmenutzung von Dieselmotoren (Abschnitt 2.5.2) wirtschaftlich betrieben werden[HSBG12a].

Im Bereich der chemischen Energiespeicher sind zunächst die Vertreter Wasserstoff und die synthetischen Kraftstoffe zu nennen. Die hohe spezifische Energie macht diese Speicher attraktiv. Jedoch ist keine Möglichkeit der Installation einer rekuperationsfähigen Anlage für die Herstellung dieser Stoffe auf dem Fahrzeug bekannt. Diese Speichermedien werden deshalb nur in speziellen stationären Anlagen zur Aufbereitung elektrischer Energie für Fahrzeuganwendungen genutzt. Zu beachten sind dabei jedoch die hohen Umwandlungsverluste bei der Herstellung der Kraftstoffe, die die Gesamteffizienz dieser Speicherverfahren im Vergleich zu Batteriespeichern abfallen lassen [Bos06]. Redox-Flow-Batterien sind vor allem für größere, stationäre Anlagen geeignet. Die gegenüber Li-Ionen-Zellen und NiMH-Systemen geringere spezifische Energie und die darüber hinaus sehr geringe spezifische Leistung machen diese Batterien für den Fahrzeugeinsatz insbesondere im Hinblick auf die Energierekuperation unwirtschaftlich [Jos07].

Sekundärbatterien¹² decken mit den verschiedenen chemischen Zusammensetzungen und damit auch variierenden Eigenschaften einen großen Bereich von Einsatzcharakteristiken ab. Die Klemmenspannung einer Batteriezelle wird dabei von der Materialpaarung von Kathode und Anode bestimmt. Als Hauptgruppen können Bleibatterien, Nickelcadmiumbatterien (NiCd-Batterien), Nickelmetallhydridbatterien (NiMH-Batterien), Natrium-Nickelchlorid-Batterien (NaNiCl-Batterien) und Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ionen-Batterien) genannt werden.

Bleibatterien sind auch als Bleigelbatterien aufgrund der geringen Zyklenzahl von maximal 10.000 Zyklen bei einer geringen Entladetiefe von zehn Prozent [Ros09] nicht für die Speicherung von Rekuperationsenergie im Personenverkehr geeignet, weiterhin ist die spezifische Energie geringer als bei den weiteren betrachteten Batterietypen. Natrium-Nickelchlorid-Akkumulatoren (auch als Zebra-Batterien bekannt) waren lange Zeit Vorreiter bei rein elektrisch betriebenen Kfz, sind aber wegen der minimal erreichten Ladedauer von sechs Stunden und der stark begrenzten Zyklenzahl für Hybridanwendungen ebenfalls ungeeignet [Jan08]. NiCd-Zellen wurden in der Dieselrangierlok von Alstom eingesetzt [OD09]. Es werden Zyklenlebensdauern von über 50.000 Zyklen bei zehn Prozent DOD angegeben ([Sch08b]). Die dabei erreichten Leistungen für Laden- und Entladen machen diesen Batterietyp für den Einsatz bei Rekuperationsaufgaben uninteressant [Jan08]. Für Hybridfahrzeuge in der Kraftfahrzeugindustrie kommen derzeit NiMH- und Li-Ionen-

¹¹ Der Schmelzpunkt von Aluminium liegt bei 660,32 °C.

¹² Der Fachbegriff für wiederaufladbare elektrochemische Energiespeicher ist Sekundärbatterie oder Akkumulator. Als Synonym wird der in der Fahrzeugtechnik häufiger verwendete Begriff Batterie verwendet.

Batterien zum Einsatz. Sie zeichnen sich durch eine hohe spezifische Energie und eine ausreichende spezifische Leistung aus und haben sich in vielen Anwendungsbereichen bewährt.

Im Weiteren werden nur die Speichersysteme betrachtet, die in der Voranalyse als grundsätzlich geeignet bewertet wurden. Das trifft für Doppelschichtkondensatoren, NiMH- und Li-Ionen-Batterien zu. Schwungmassenspeicher sind betreffend der spezifischen Leistung und Energie mit Doppelschichtkondensatoren vergleichbar, bei den hohen Anforderungen der Bahntechnik hinsichtlich mechanischer Schockbeanspruchung¹³ sind diese jedoch als kritisch zu betrachten.

2.6.4 Doppelschichtkondensatoren

Doppelschichtkondensatoren, auch als Boostcaps oder Supercaps bezeichnet, speichern die Energie in einem elektrischen Feld zwischen der Grenzfläche von Elektrode/Elektrolyt und den entsprechenden Gegenionen im Elektrolyten, die durch die sich ausbildende sogenannte Helmholtzschicht voneinander getrennt sind (Abbildung 2-5). Aufgrund der gegenüber dem Dielektrikum in normalen Kondensatoren geringen Dichte dieser Schicht ist die Kapazität von Doppelschichtkondensatoren erheblich größer [Wai04]. Insofern kann die Doppelschicht also als Reihenschaltung von zwei Kapazitäten betrachtet werden, die jedoch im Ersatzschaltbild zusammengefasst werden können.

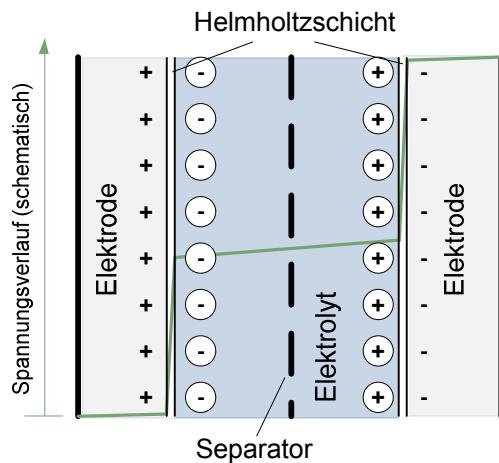


Abbildung 2-5: Aufbau eines Doppelschichtkondensators (nach [Köt02])

Die Proportionalitätskonstante zwischen Ladung Q und Spannung am Kondensator U_{DSK} wird als Kapazität bezeichnet:

$$Q = C_{\text{DSK}} \cdot U_{\text{DSK}}. \quad (2.2)$$

Für jeden Doppelschichtkondensator gibt es eine maximale Spannung $U_{\text{DSK},\max}$, die aufgrund der dann rapide abnehmenden Lebensdauer nicht überschritten werden sollte. Der sinnvoll nutzbare

¹³ Die mechanischen Anforderungen für Betriebsmittel, welche zum Einsatz auf Bahnfahrzeugen vorgesehen sind, sind in der DIN EN 61373 „Bahnanwendungen – Betriebsmittel von Bahnfahrzeugen – Prüfungen für Schwingen und Schocken“ verzeichnet.

Spannungsbereich wird nach unten durch die gegenproportional ansteigenden Ströme auf die Hälfte der Maximalspannung begrenzt. Damit reduziert sich nach

$$E_{\text{DSK}} = \frac{C_{\text{DSK}} \cdot (U_{\text{DSK,max}}^2 - U_{\text{DSK,min}}^2)}{2} \quad (2.3)$$

der verfügbare Energieinhalt auf 75 Prozent. Charakteristisch für Doppelschichtkondensatoren sind die hohe spezifische Leistung und die gute Zyklenfestigkeit. Aufgrund des geringen Innenwiderstands der Systeme weisen sie einen hohen Wirkungsgrad auf und sind auch ohne Flüssigkeitskühlung zu betreiben. Die zyklische Lebensdauer ist bei Betrieb unter nominellen Bedingungen mit bis zu einer Million erreichter Zyklen sehr hoch. Trotz der wesentlich höheren Kapazität gegenüber normalen Kondensatoren ist die erreichbare spezifische Energie relativ gering. Positiv zu erwähnen ist die Marktreife der Produkte und die Verfügbarkeit skalierbarer größerer Module mit integrierter Kühlung und Zustandsüberwachung. [Max08a]

Für die Lebensdauer von Superkondensatoren ist eine Vielzahl von Faktoren ausschlaggebend:

- Die maximale und minimale Betriebsspannung,
- der Effektivstrom über einen längeren Zeitraum,
- der Maximalstrom,
- die vorherrschende Umgebungstemperatur und die
- Anzahl der Zyklen.

Das nachfolgende Diagramm (Abbildung 2-6) zeigt beispielhaft die Kapazitätsabnahme in Abhängigkeit von der Zyklenzahl bei verschiedenen Maximalspannungen. Höhere Spannungen führen zur Zersetzung des Elektrolyten. Aus der Abbildung geht hervor, dass unter den angegebenen Bedingungen bei 2,5 V ca. eine Million Zyklen bei 20 Prozent Kapazitätsverlust möglich sind. Das Lebensdauerende ist für Doppelschichtkondensatoren der Fa. Maxwell Technologies bei 80 Prozent der Nennkapazität und der Verdopplung des Innenwiderstands definiert [Max08a].

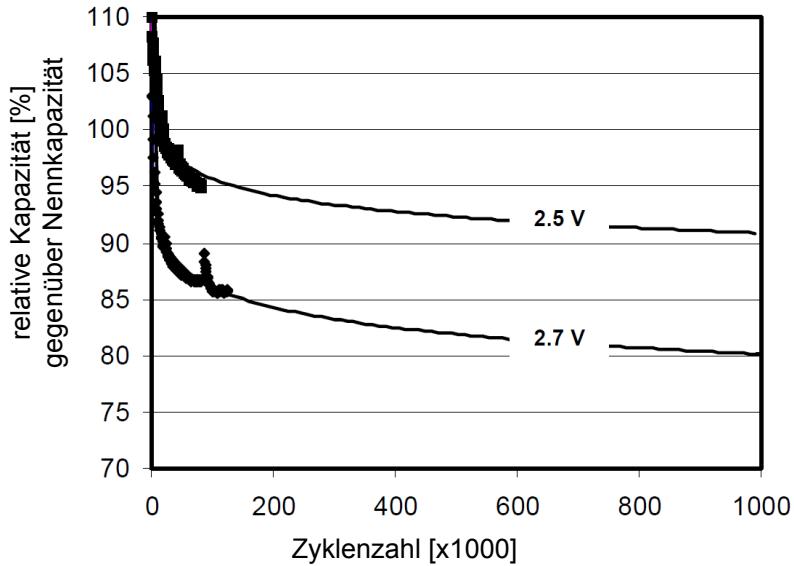


Abbildung 2-6: Relative Kapazität in Abhängigkeit von der Zyklenzahl [Max08b] (Randbedingungen: Typ Maxwell BCAP 2600 bei maximalem Dauerstrom, Umgebungstemperatur 25 °C)

2.6.5 Sekundärbatterien

In der Vorevaluation (Kap. 2.6.3) wurden für das Speicherziel Energierekuperation die Batterietypen NiMH- und Li-Ionen-Batterien ausgewählt. Die wesentliche Neuerung bei NiMH- und Li-Ionen-Batterien ist das veränderte Prinzip der Einlagerung an den Elektroden. Der ungeordnete Auf- und Abbau der Elektroden und die Wechselwirkung der Elektroden mit dem Elektrolyten bei Bleibatterien werden bei NiMH- und Li-Ionen-Batterien verhindert, indem die aktive Masse in Gittern ein- und wieder ausgelagert wird. Dabei bleibt die Gitterstruktur der Elektroden (die aktive Masse ordnet sich in einer Gitterstruktur auf den Elektroden an) beim Lade- und Entladevorgang bestehen. Dieser Einlagerungsprozess wird Interkalation genannt und ist Ursache für die wesentlichen Vorteile dieser Technologien [GBKS07].

NiMH-Batterien

NiMH-Batterien sind heute die Standard-Akkumulatoren für Geräte im Alltagsgebrauch, die nicht mit speziellen Ladegeräten betrieben werden. Bei Schienenfahrzeugen ist dieses Batteriesystem bereits bei Straßenbahnen im Einsatz [Pre09]. Nach Angaben des Batterieherstellers Saft kann dieser Speicher bei einer maximalen Entladetiefe (DOD) von 20 Prozent bis zu 60.000 Zyklen erreichen [Saf06].

So werden höhere Zyklenzahlen, wesentlich höhere spezifische Energien und ein gleichbleibender Innenwiderstand über fast den gesamten SOC-Bereich erreicht. Nur in den SOC-Randbereichen kommt es zu leichten Innenwiderstandserhöhungen, so dass die Batterie bei Volladnung und Tiefentladung zu starken Erwärmungen neigt [Jos09]. Bei niedrigen Temperaturen sinkt die Leistungsfähigkeit von NiMH-Batterien erheblich. Ab Temperaturen unter -20 °C fällt die spezifische Leistung unter den Wert von Bleibatterien. Je nach Applikation kann sie als High-Power-(spezifische gravimetrische Energie \approx 55 Wh/kg) oder High-Energy-Zelle (\approx 100 Wh/kg) ausgelegt werden

([JW06], S. 64).¹⁴ Die Kosten für NiMH Zellen liegen beim drei- bis fünffachen von Bleibatterien. Eine wesentliche Reduzierung der Produktionskosten ist aufgrund der teuren Rohstoffe (insbesondere Nickel) nicht zu erwarten.

Lithium-Ionen-Batterien

Wiederaufladbare Li-Ionen-Zellen wurden in den achtziger Jahren entwickelt. Li-Ionen-Batterien können durch die Variation der Materialpaarungen für die negative und die positive Elektrode verschiedene Eigenschaften erhalten. Die negative Elektrode besteht üblicherweise aus den Kohlenstoffvarianten Grafit oder amorphem Karbon, aber auch Lithiumtitanate sind für besonders hohe Leistungen gebräuchlich. Für die positive Elektrode sind herstellerspezifisch viele verschiedene Materialvarianten entstanden. Ausgewählte, für Traktionsbatterien relevante, chemische Kombinationen sind in Tabelle 2-6 aufgeführt.

Aufgrund der hohen spezifischen Energie und Leistung, der hohen Strombelastbarkeit und einer ausreichenden Leistungsfähigkeit auch bei tiefen Temperaturen (bis -30 °C) stellt die Li-Ionen-Technologie derzeit die Spitzenposition unter den Batterietechnologien dar. Sie ist heute bereits Standard für Notebooks, Mobiltelefone, Digitalkameras und andere portable Geräte. Eine erhebliche Reduzierung der Produktionskosten scheint aufgrund ausreichend vorhandener Rohstoffe¹⁵ in der Massenproduktion erreichbar zu sein. Weitere Vorteile liegen in der hohen Zykluslebensdauer, geringen Selbstentladung, guten Lagerfähigkeit und einem hohen energetischen Wirkungsgrad. Daneben bietet diese noch junge Technologie Raum für signifikante zukünftige Weiterentwicklungen und hat damit ein großes Potential für den serienmäßigen Einsatz in Traktionsanwendungen.

Lebensdauer

Die Lebensdauer von Li-Ionen-Zellen wird durch die mögliche Anzahl der Zyklen und die kalendarische Lebensdauer charakterisiert. Die kalendarische Lebensdauer wird primär durch den vorherrschenden Ladegrad- und die Temperaturen bestimmt. So sollen tiefe (SOC < 10 %) und besonders bei Lithium-Zellen auch hohe Ladezustände (SOC > 80 %) vermieden werden.

Die Zykluslebensdauer der Sekundärbatterien hängt sehr stark von der Entladetiefe ab. Dieser Zusammenhang ist nicht proportional. So kann bei geringen Entladetiefen in einem günstig gewählten SOC-Bereich wesentlich mehr Ladung umgesetzt werden, als dies bei einer hohen Ausnutzung der Fall ist (Abbildung A-1). Die dabei angegebenen Werte sind jedoch durch Versuche mit Einzelzel-

¹⁴ Die Begriffe High-Power- und High-Energy-Zellen stehen für Batterien, bei denen bei der Entwicklung mehr Wert auf die Möglichkeit der Bereitstellung hoher Leistungen (High-Power) bzw. einer hohen spezifischen Energie (High-Energy) Wert gelegt wurde. Die deutschen Begriffe Hochleistungszelle und Hochenergiezelle sind weniger gebräuchlich.

¹⁵ Eine Studie des Fraunhofer ISI [AMWW09] geht davon aus, dass „selbst unter extremen Annahmen in den nächsten vier Jahrzehnten nicht mit einer Knappheit der Lithium-Reserven zu rechnen ist“. Als problematisch könnte sich jedoch die Konzentration der Vorräte auf wenige Regionen (vorwiegend Südamerika und China) erweisen.

len bei idealen Umgebungstemperaturen entstanden. Beim Aufbau größerer Batteriemodule muss deshalb auf eine Batterieüberwachung (engl. BMS – battery management system) mit der Möglichkeit des Ladungsausgleichs zwischen Zellen (engl. cell balancing) und ein ausreichend dimensioniertes Thermomanagementsystem geachtet werden. So können Über- bzw. Unterspannungen an Zellen verhindert und die Temperatur an allen Punkten in einem für den Batterietyp verträglichen Temperaturfenster gehalten werden.

Tabelle 2-6: Überblick über verschiedene Typen von Batteriezellen (nach [Bau09], [JW06], [Vog09], [LNG+08])

Zelltyp	spez. Energie [Wh/kg]	Vorteile	Nachteile	Produzenten
Nickel-Cobalt-Aluminium (LNCA)	170	höchste Marktreife, spezifische Energie und Leistung	Sicherheit (thermische Stabilität), Kosten, Lebensdauer, eingeschränkter Arbeitsbereiche	JC/Saft, PEVE (Toyota, Matsushita)
Nickel-Mangan-Cobalt (NMC)	130	Sicherheit (zumindest mit keramischem Separator), spezifische Energie, Lebensdauer	Kosten	Li-Tec, Hitachi, Panasonic, Sanyo, Samsung
Manganspinell (LMO)	150	Kosten	Lebensdauer, Sicherheit, Tieftemperatur	AESC (Nissan, NEC), Sanyo, LG, Electrovaya, GS Yuasa, Samsung
Lithium-Titanat (LTO)	150	Sicherheit, Lebensdauer, hoher Nutzungsbereich	spezifische Energie	Toshiba, Altairnano, Ener1
Lithium-Eisen-Phosphat (LFPO)	140	Sicherheit, Lebensdauer, großer Arbeitsbereich, Kosten	Tieftemperatur, spezifische Energie	A123, BYD, Austin Power, Valence, Saft, Gaia

Ein spontaner Ausfall der Zellen bei Normgebrauch tritt nicht auf. Kriterien für das Ende der Lebensdauer liegen bei einem bestimmten Wert der Nennkapazität (typischerweise 60 bis 80 Prozent) und eines bestimmten Anstiegs des Innenwiderstands (oft einer Verdopplung) [JW06].

Batteriemanagement

Die zulässigen Ladeschluss- und Entladeschlussspannungen müssen genau beachtet werden. Die Nichteinhaltung führt zu irreversiblen chemischen Prozessen, das heißt einer dauerhaften Schädigung der Zelle (verringerte Kapazität und Zyklenzahl). Im Vergleich zu NiMH-Batterien ist bei Li-Ionen-Zellen eine Einzelzellüberwachung zwingend erforderlich. Daraus erwachsen neue Anforderungen an die Strukturen von Batteriemanagementsystemen und Zellsymmetrierungsschaltungen, welche die Kosten steigern [SF09].

Sicherheit

Aufgrund der guten Brennbarkeit von Lithium und der Explosionsgefahr durch ein fehlerhaftes Batteriemanagementsystem oder durch einen Kurzschluss des Speichersystems, spielt die Sicherheitsthematik eine große Rolle. Wichtig ist dabei die Paarung von Elektrolyt und Elektrode, welche dafür ausschlaggebend ist, ob bei zu hohen Zelltemperaturen ein selbstverstärkender Erhitzungsprozess in Gang gesetzt wird oder nicht (engl. thermal runaway). Als Sicherheit gegen die explosionsartige Energiefreisetzung beim Eindringen von leitenden Fremdkörpern (Nageltest) spielen insbesondere neu entwickelte keramische Separatoren eine bedeutende Rolle. Sie halten den auftretenden sehr hohen Temperaturen stand und verhindern damit eine explosionsartige Entladung der Batterie. Keramische Separatoren werden z. B. von der Fa. Li-Tec entwickelt und eingesetzt [Zsc10]. Durch die UN-Transporttests (UN 3480), welche ein Batteriehersteller vor dem Transport der Zellen nachweisen muss, wird die Sicherheit der Zellen bereits weitestgehend sichergestellt [HS09]. Nach einem festgelegten Prüfablauf müssen mehrere Einzelzellen auf:

- Druckabfall,
- thermische Beanspruchung (Temperaturwechsel),
- Schwingungsempfindlichkeit,
- mechanische Schockbelastung (Halbsinus),
- äußeren Kurzschluss und
- Überladen geprüft werden.

2.6.6 Vergleichende Betrachtung

In der Vorbetrachtung (Abschnitt 2.6.3) wurde eine Grobevaluation der zur Verfügung stehenden Energiespeicher durchgeführt. Die ausgewählten Speichersysteme wurden in den darauffolgenden Abschnitten näher untersucht, die Kennwerte der Zelltypen werden in Tabelle 2-7 dargestellt. Im Folgenden sollen einzelne Aspekte vergleichend betrachtet werden.

Vergleich der Eignung für den Einsatzzweck

Zum Vergleich der Leistungsfähigkeit und der Einsatzmöglichkeiten der Speichersysteme werden sogenannte Ragone-Diagramme eingesetzt. In diesen Schaubildern ist die spezifische gravimetrische Leistung von Speichersystemen über der spezifischen Energie dargestellt. Die Skalierung der Achsen kann logarithmisch oder linear erfolgen. Ein Beispiel aus einer Veröffentlichung ist im Anhang (Abbildung A-3) dargestellt. Oft ist weiterhin die Relation zwischen spezifischer Leistung und Energie dargestellt, welche als Entladezeit gedeutet werden kann.

Tabelle 2-7: Gegenüberstellung verschiedener Energiespeicher (eigene Recherche in Datenblättern, [Jan08], [Sch08b], [JW06], [Sau09], [Saf05a])

Parameter	NiMH	Li-Ionen	DSK
Spezifische Energie [Wh/kg] (Nennenergie)	55 – 100	60 – 180	1 – 6
Spezifische Leistung [kW/kg] (Entladen: >10 Sekunden)	0,1 – 0,3	0,1 – 4	1 – 9
Energie-Leistungsrelation [s]	600 – 2.520	50 – 6.500	0,6 – 22
Lebensdauer [Jahre]	> 10	> 10	> 10
Empfohlener SOC-Bereich [%]	10 – 90	10 – 90	25 – 100
Zyklenlebensdauer (2,5 % DOD)	>500.000	>500.000	>1.000.000
Zyklenlebensdauer (10 % DOD)	150.000	150.000	>1.000.000
Zyklenlebensdauer (75 % DOD)	1.000 – 2.000	1.000 – 4.500	>1.000.000
Temperaturbereich für Lagerung [°C]	-20 bis 60	-20 bis +40	-40 bis +65
Kosten pro Nennenergiemenge [€/kWh]	700 – 1.500	300 – 1.500	10.000 – 20.000

Bei der Interpretation dieser Diagramme können aus Sicht des Autors folgende Probleme festgestellt werden:

- die mögliche Speicherleistung ist bei allen Typen abhängig von der Entladedauer,
- aus Lebensdauergründen kann bei Batterien im Hybridbetrieb nur ein Teil der Energiemenge genutzt werden,
- die vollständige Entladung von Superkondensatoren ist ebenfalls nicht sinnvoll (Ursache: Abnahme der Leistungsfähigkeit im unteren Spannungsbereich),
- die dargestellten Werte beziehen sich in der Regel auf Zellen und nicht auf fertige Module,
- bei High-Power-Li-Ionen-Zellen werden die großen Entladeleistungen beim Laden nicht erreicht und
- die bei Lebensdauerversuchen genutzten Lade- und Entladeraten liegen erheblich unter den möglichen Lade- und Entladeleistungen.

Trotzdem soll versucht werden, das Ragone-Diagramm durch Vorgabe von Randbedingungen als Argumentationsinstrument für die Bewertung der Speicher hinsichtlich des vorliegenden primären Einsatzzwecks der Kraftstoffeinsparung mit Hilfe der Energerekuperation zu nutzen. Dafür wurde ein Ragone-Diagramm aus Datenblattangaben unter folgenden Randbedingungen erstellt:

- Für die spezifische Leistung wurden Leistungsangaben herangezogen, welche über 30 Sekunden erreicht werden können, ohne die Zelle zu schädigen.
- Der nutzbare Energieinhalt der Doppelschichtkondensatoren wurde wie in der Empfehlung von Maxwell Technologies mit 75 Prozent angesetzt, dabei wird ein Spannungshub von 50 Prozent der Nennspannung erlaubt [Max08a].

- Die energetische Entladetiefe der Batterien wurde auf 10 Prozent beschränkt.¹⁶ Dies ermöglicht nach Abbildung A-1 sowohl für Li-Ionen- als auch für Nickel-Metallhydrid-Batterien eine Lebensdauer von über 150.000 Zyklen.

Das entstehende Diagramm (Abbildung 2-7) macht deutlich, dass der Unterschied in der spezifischen Energie zwischen Doppelschichtkondensatoren und modernen Traktionsbatterien nicht so gravierend ist, wie bei Vergleich der Nennangaben angenommen werden kann. Auch gibt es, anders als in Abbildung A-3 suggeriert, keine „Lücke“ bei passenden Hochleistungsspeichern für einen bestimmten Ladezeitbereich. Bei gleicher Skalierung von Abszisse und Ordinate wird außerdem sichtbar, dass das Einsatzspektrum von Doppelschichtkondensatoren gegenüber dem von Batterien ähnlich groß ist.

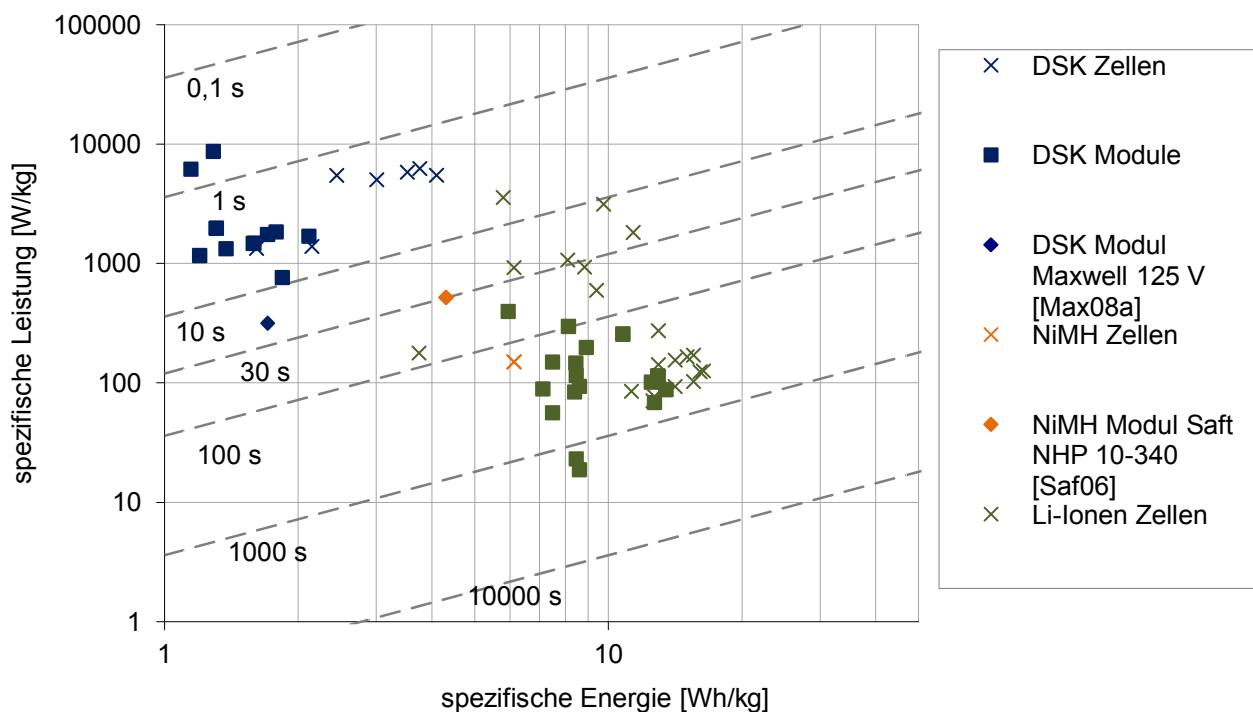


Abbildung 2-7: Ragone-Diagramm mit eingezeichneten Isolinien der Entladezeit (spezifische Energie unter Berücksichtigung einer eingeschränkten Nutzung des Speicherinhalts, DOD für Batterien: 10 %, DOD für DSK: 75 %, [Datenblätter verschiedener Hersteller, Dezember 2010])

Es wird deutlich, dass Doppelschichtkondensatoren für Entladedauern von weniger als 30 Sekunden aus technischer Sicht die beste Variante darstellen. Der Betrieb unterhalb der Leistungsgrenze bringt das Erreichen der Nennlebensdauern mit sich und erleichtert dank geringer Verlustleistungen die Integration, da auf eine aufwändige Flüssigkeitskühlung verzichtet werden

¹⁶ Der gleiche Ladefub wird auch in einer Veröffentlichung zur Planung des Hybrid Powerpacks für Triebwagen dargestellt, welches ebenfalls auf den Einsatz einer Li-Ionen-Batterie setzt [LSWB11].

kann. Der Bereich über 30 Sekunden scheint vom Zeitverhalten eher für Hochleistungsbatterien prädestiniert zu sein. Durch das NiMH-Modul Saft NHP 10-340 wurde die Einsatzfähigkeit solcher Module bei Schienenfahrzeugen bereits nachgewiesen [Sch08b].

Kosten

Bei LCC-Betrachtungen spielen die Speicherkosten eine erhebliche Rolle für die Entscheidung zwischen Speichertypen. Für Li-Ionen-Batterien werden Kosten von 1500 €/kWh für Prototypen-Hochenergiespeicher angegeben [Sau09]. Das Einsparpotential durch Serienproduktion kann man am Zelltyp 18650¹⁷, wie sie beispielsweise in Laptops verwendet werden, erkennen. Eine eigene Marktanalyse im März 2011 ergab für diese Zellgröße einen Preisbereich von 374 bis 1900 €/kWh bei kleinen Abnahmemengen. Der Preis variiert dabei vor allem durch die Herkunft der Zellen. Es sind jedoch auch Zellen von Markenherstellern für unter 600 €/kWh zu finden. Bemerkenswert ist, dass Li-Ionen-Zellen von Panasonic bezogen auf die Nennenergie günstiger als NiMH-Zellen vom gleichen Hersteller sind. Dies deckt sich mit Aussagen von Marktforschungen, die für NiMH-Zellen von einem doppelt so hohem Zellpreis gegenüber Li-Ionen-Zellen ausgehen ([LNG+08], S. 30). Schwierig ist ebenfalls die Bewertung von High-Power-Zellen, für die schon aufgrund der wesentlich geringeren spezifischen Energie höhere energiebezogene Kosten anzusetzen sind ([LNG+08], S. 30).

Eine Reduktion der Preise für Traktionsbatterien ist getrieben durch steigende Stückzahlen und der Batterieentwicklung für elektronische Geräte weiterhin möglich. Voraussetzung für eine Kostenreduktion ist das Entstehen eines ausgeprägten und transparenten Marktes für Zellen und skalierbare Module größerer Leistung. Für diese Produkte existiert bis heute kein einheitlicher Standard. Die Anfertigung der Module erfolgt kundenspezifisch und in Kleinserie. Die Kosten für ein komplettes Speichersystem aus mehreren Zellen inklusive Kühlung, Batterieüberwachung und Umrichter werden jedoch auch langfristig weit über dem reinen Zellpreis liegen.

Doppelschichtkondensatoren in Form von Einzelzellen wurden im Jahr 2006 für ca. 10.000 €/kWh ([Bal06]) angeboten. Größere anschlussfertige Module [Max08a] sind auf dem Markt verfügbar. Die Kosten müssen in Zusammenhang mit den erreichbaren Zykluszahlen gesehen werden, welche mit ca. einer Million Vollzyklen im Vergleich zu Traktionsbatterien sehr hoch sind.

Betrieb von mehreren Speichersystemen auf dem Fahrzeug

Wie gezeigt wurde, haben verschiedene Speichertypen unterschiedliche Charakteristika bezüglich ihrer spezifischen Leistung und Energie und damit unterschiedliche minimale Lade- und Entladezeiten. Eine naheliegende Frage ist, ob deshalb der gleichzeitige Betrieb mehrerer Speichersysteme mit verschiedener Charakteristik sinnvoll ist. Denkbare Szenarien sind dabei:

1. Es treten Kurzzeitbelastungen auf, bei denen die benötigte Leistung über der Entladeleistung des bereits verwendeten Energiespeichers liegt.

¹⁷ standardisierte Rundzellen: 18 mm Durchmesser, 65 mm Länge.

2. Es ist nicht möglich, die mit dem installierten Energiespeichersystem in günstigen Arbeitspunkten aufgenommene Leistung vor einer neuen günstigen Lademöglichkeit¹⁸ abzugeben. Ein Umladen in ein Speichersystem mit größerer spezifischer Energie wäre möglich.
3. Es treten neben sehr langen günstigen Ladungsphasen häufig auch kurze günstige Ladungsphasen auf, welche über sehr leistungsfähige Speicher abgedeckt werden können, deren nutzbare Speicherkapazität gegenüber der Gesamtkapazität klein ist.

Es ist zu prüfen, ob die aufgeführten Fälle für das untersuchte Hybridsystem relevant sind. Szenario eins kann bei Hybridfahrzeugen im Kraftfahrzeugbereich bei Überholvorgängen auftreten. Eine signifikante Leistungssteigerung für eine kurze Zeit ist hier wünschenswert und rechtfertigt ggf. den Einsatz eines Speichersystems mit kurzer Entladedauer. Bei Schienenfahrzeugen im Regionalverkehr ist ein solcher Anwendungsfall nicht gegeben. So tritt eine solche Anforderung bei dieselelektrischen Fahrzeugen nur während Startvorgängen bzw. transienter Vorgänge auf. Bei ersteren tritt eine hohe Belastung der Bordnetzbatterie auf, welche durch die Stützung über Doppelschichtkondensatoren gesenkt werden kann [PRP09]. Bei letzteren handelt es sich um schnelle Lastaufschaltungen, bei denen ein Kurzzeitspeicher eine erweiterte Stützung des Zwischenkreises über die installierte Zwischenkreiskapazität hinaus übernehmen kann. Bei der untersuchten Lokomotive wird in solchen Situationen jedoch ein Spannungseinbruch über den Fahrmotorstromrichter vermieden, welcher die Traktionsleistung bei abfallender Zwischenkreisspannung reduziert [Sch11d]. Eine Untersuchung der aufgeführten Fälle bietet sich im Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung nicht an.

Szenario zwei kann beispielsweise bei wegseitigen Energiespeichersystemen in Straßenbahnenzen eintreten. Bei der betrachteten Zugkonfiguration spielt sie jedoch keine Rolle. Sind Verzögerungsphasen durch Konstantfahrphasen unterbrochen, ist eine energetisch sinnvolle Entladung der Speicher aufgrund der notwendigen Zugenergieversorgung und der Traktionsleistung in der Zwischenzeit in der Regel durchführbar. Bei begrenzten Zeiten zwischen den Verzögerungsphasen ist eine Umladung in einen Speicher mit einer großen Ladezeit zudem kaum möglich.

Szenario drei kann bei kurzen Rekuperationsphasen bei stark welligem Profil gegeben sein. Dieses wird in der Regel jedoch bei der Streckenplanung vermieden. Längere Gefällestrecken fallen wegen der hohen Ladezeiten nicht in diese Kategorie. Das häufige Bremsen aus niedrigen Geschwindigkeiten, wie es z. B. bei Stausituationen im Straßenverkehr auftritt, ist bei Zugfahrten unbekannt. Untersuchungen ergaben die Nutzbarkeit bei hochdynamischen Innenstadtfahrten von Kraftfahrzeugen, wo z. B. ein Doppelschichtkondensator eine auf langsame Entladung ausgelegte Traktionsbatterie unterstützt und die Reichweite eines solchen Elektrofahrzeugs dadurch verlängert werden kann ([BSS05], [ZS09]).

Eine signifikante Steigerung der rekuperierbaren Ladungsmenge ist dagegen nicht zu erwarten, wenn wie beim Anwendungsfall Streckenlokomotive nur der Speicherbetrieb mit dem Ziel der Re-

¹⁸ In der Regel handelt es sich dabei um Rekuperationsphasen.

kuperation im Vordergrund steht. Ursache dafür ist, dass die Kombination von Energiespeichern mit geringer und hoher Zeitkonstante zur Abbildung eines Speichers mit mittlerer Zeitkonstante zumindest bezogen auf die Speichermasse in der Regel nicht zielführend ist. Als Beispiel soll eine massenbasierte Betrachtung für zwei Speicher durchgeführt werden, wobei für die Betrachtung gilt:

$$\Delta t_{\text{norm,Speicher1}} = \frac{E_{\text{norm,Speicher1}}}{P_{\text{norm,Speicher1}}}$$

$$P_{\text{spez,Speicher2}} = 0,5 \cdot P_{\text{spez,Speicher1}}$$

$$E_{\text{spez,Speicher2}} = 2 \cdot E_{\text{spez,Speicher1}}.$$
(2.4)

Das Ergebnis ist in Abbildung 2-8 dargestellt. Ist ein Speicher jeweils hinsichtlich einer Kenngröße besser als der andere, so ergeben für eine bestimmte Entladezeit alle Konfigurationen aus beiden Speichertypen die gleiche umsetzbare Energiemenge. Liegen typische Lade- und Entladezeiten in diesem Bereich, ist eine Kombination von Speichern zumindest im Hinblick auf die Nettomasse der verbauten Speicherzellen denkbar. In allen anderen Fällen erzeugt jeweils eine Konfiguration aus nur einem Speichertyp das bessere Ergebnis. Weiterhin sprechen die höheren Aufwendungen für den Betrieb zweier Speichersysteme (Erhöhung der Komplexität, der Wartungsaufwendungen, der Integrationskosten und ggf. der Zusatzmasse für die Integration) gegen eine solche Applikation. Die folgenden Betrachtungen in der Arbeit werden deshalb auf ein einzelnes Speichersystem auf dem Fahrzeug begrenzt.

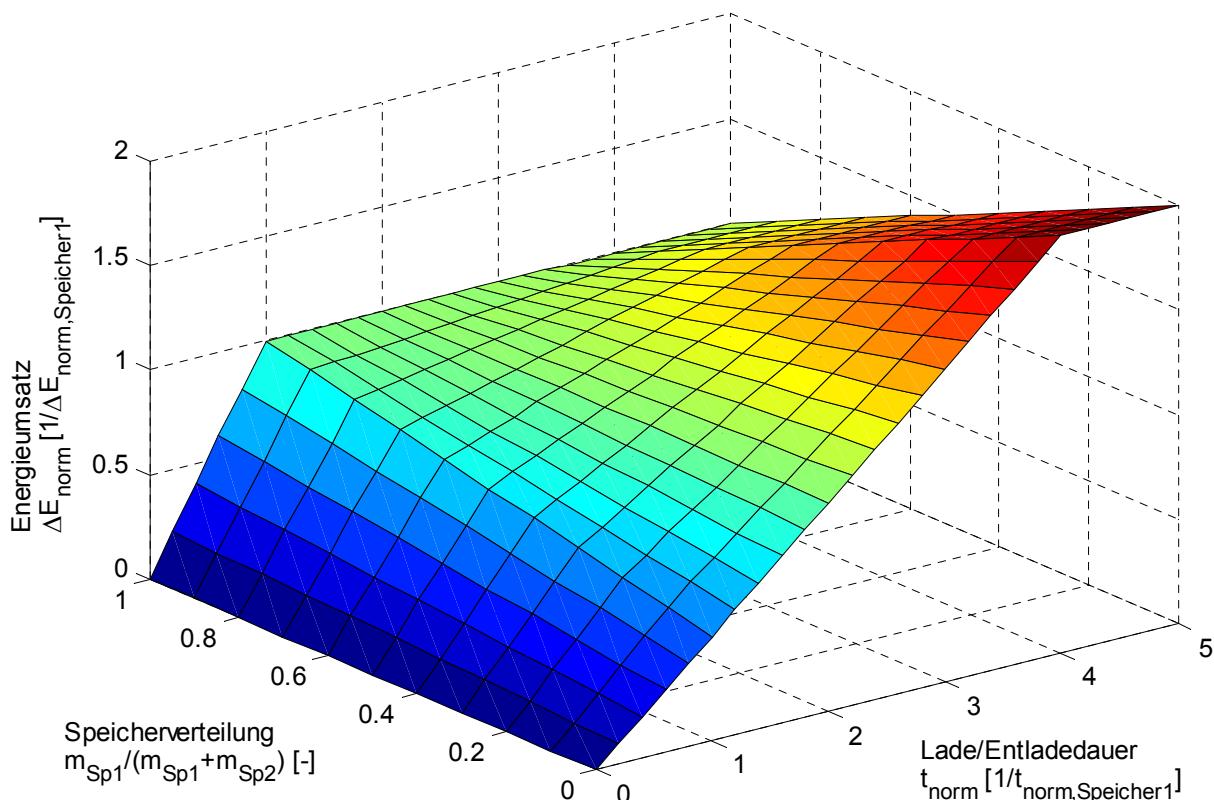


Abbildung 2-8: Spezifischer Energieumsatz von Kombinationen aus zwei Energiespeichern

Zusammenfassung

Bei der Betrachtung der Speichersysteme wird klar, dass die untersuchten Systeme eine Vielzahl von Unbekannten aufweisen. Das trifft insbesondere auf die für diese Anwendung besonders attraktiven Li-Ionen-Batterien zu. So gibt es zwar Abschätzungen zur Lebensdauer der unterschiedlichen Batterietypen, aber die Publikation von Felderfahrungen mit Hybridfahrzeugen steht noch aus. Außerdem werden die ZyklenTests für High-Power-Zellen oft mit Leistungen weit unterhalb der angegebenen Dauerleistungen für Laden und Entladen durchgeführt und belastbare Korrekturwerte sind nicht verfügbar. Weiterhin gibt es zwar Prognosen für die Entwicklung der Batteriekosten und der Siegeszug der Lithium-Ionen-Zelle wird vorausgesagt, noch sind aber auf dem Markt keine standardisierten Module größerer Leistung verfügbar, so dass die Kostenprognosen mit einer großen Unsicherheit behaftet sind. Insofern wird davon ausgegangen, dass alle in diesem Abschnitt betrachteten Speichertypen untersuchungswürdig und damit in der Simulation zu betrachten sind.

2.6.7 Integration von Energiespeichern in dieselelektrische Fahrzeuge

Die gewählten Speichertypen können alle mit dem elektrischen System des Fahrzeugs gekoppelt werden. Sowohl Doppelschichtkondensatoren als auch Batterien stellen Gleichspannungsquellen dar. Somit kann die Anbindung direkt an bestehende Gleichstromzwischenkreise oder mit Hilfe leistungselektronischer Bauelemente erfolgen (Abbildung 2-9). Die Integrationsvarianten werden im Folgenden mit ihren Vor- und Nachteilen erörtert.

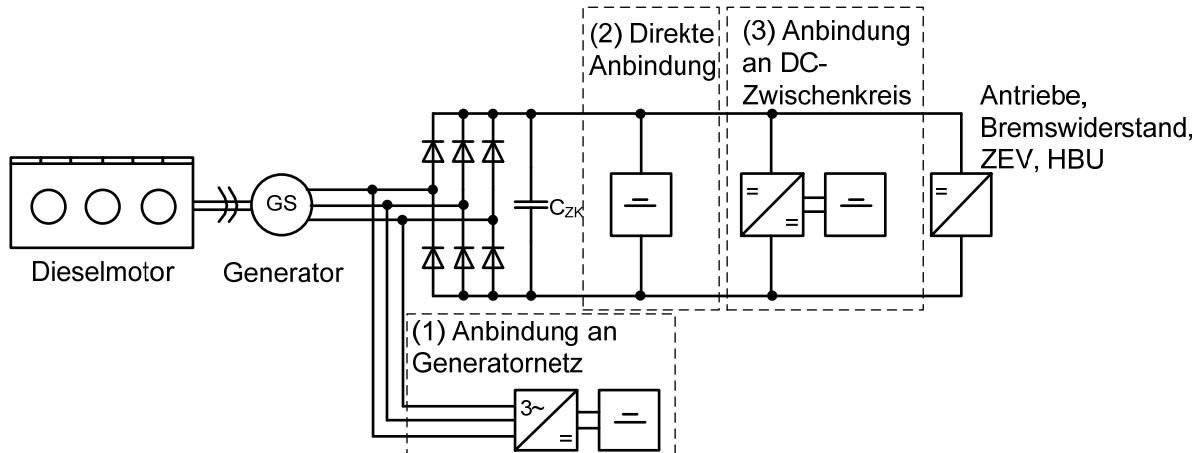


Abbildung 2-9: Integration von Energiespeichern auf der Lokomotive (schematisch)

Unterstützung des Generatordrehstromkreises (1)

Diese Topologie ist für Maschinen oder Fahrzeuge mit Gleichstromantrieben von Bedeutung. Hierbei kann der Speicher über das Genset aufgeladen bzw. das Genset über den Speicher gestützt werden. Wenn die DC-Antriebe über rückspeisefähige Gleichrichter im Drehstromnetz angebunden sind, kann die Rekuperation von überschüssiger Energie in den Speicher erfolgen. Diese Topologie wurde von der Fa. Gottwald Port Technology in Kooperation mit der TU Dresden erfolg-

reich zur Einbindung eines Doppelschichtkondensators umgesetzt [SBT+10]. Dabei wird die Spannung drehstromseitig mit einem Transformator so angepasst, dass ein bidirektionaler Umrichter den für den Betriebsbereich der Doppelschichtkondensatoren notwendigen Stellbereich auf Gleichstromseite abdecken kann. Gleichzeitig wird damit eine galvanische Trennung erreicht. Bei einem Drehstromantriebssystem mit DC-Zwischenkreis ist diese Topologie nicht zielführend. Die ungesteuerte B6-Gleichrichterbrücke ist nicht rückspeisefähig und müsste ersetzt werden, damit eine Rekuperation der Antriebsenergie ermöglicht wird. Weiterhin ist der Wechselrichter komplexer und teurer als der DC/DC-Wandler.

Direkte Kopplung an einen Gleichstromzwischenkreis (2)

Eine einfache Integrationsmöglichkeit bietet die direkte Einbindung der elektrischen Energiespeicher in den Zwischenkreis. Diese Technologie wurde von Alstom bei einer Hybridrangierlokomotive eingesetzt [OD09]. Die Topologie hat den Vorteil, dass die Zwischenkreisspannung direkt durch den Speicher gestützt wird. Die Speichersteuerung erfolgt dabei mit Hilfe der Generatorenspannung $U_{\text{GEN,DC}}$. Der Einsatz von Doppelschichtkondensatoren als Traktionsenergiespeicher ist deshalb bei dieser Topologie aufgrund deren großen Spannungsbereichs praktisch ausgeschlossen. Der stattdessen eingesetzte Batteriespeicher wird geladen, wenn die Generatorenspannung größer als die Klemmenspannung der Batterie U_{BAT} ist:

$$U_{\text{GEN,DC}} \geq U_{\text{BAT}}. \quad (2.5)$$

In allen anderen Phasen wird die Rangierlokomotive rein elektrisch über den Speicher versorgt. Nachteilig ist, dass bei ungesteuerten Gleichrichtern die Generatordrehzahl trotz gegebenenfalls einstellbarer Erregung der Maschinen nicht beliebig gestellt werden kann. Diese Einschränkung kann dazu führen, dass stark verlustbehaftete Punkte im Arbeitsbereich des Gensets angefahren werden müssen bzw. die Leistung des Gensets nicht ausgeschöpft werden kann. Beim Speichereinsatz in einer dieselektrischen Streckenlokomotive wiegt dieser Nachteil besonders schwer, da die Batterie in Traktionsphasen in der Regel nur zur Unterstützung des Gensets eingesetzt werden kann.

Anbindung in den DC-Zwischenkreis mit einem DC/DC-Wandler (3)

Die Anbindung an den Zwischenkreis mit einem DC/DC-Wandler stellt eine variable Art der Anbindung dar. Ein bidirektionaler DC/DC-Wandler (Abbildung 2-10) ermöglicht die unabhängige Stellung der Speicherspannung U_{SPE} von der Zwischenkreisspannung U_{ZK} . Damit bleiben alle Freiheitsgrade für die Speichersteuerung erhalten. Als leistungselektrische Schalter werden heute in der Regel Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode (IGBT) verwendet. Mit Ihnen kann das Schaltverhalten aktiv gesteuert werden. Wenn sichergestellt werden kann, dass die Speicherspannung in jedem Betriebspunkt kleiner ist als die Zwischenkreisspannung, kann die Topologie vereinfacht und es können zwei IGBTs (Abbildung 2-10: T3, T4) eingespart werden [Zim09]. Weitere Erläuterungen zur Ansteuerung der leistungselektronischen Stellglieder und verfeinert DC/DC-Wandler-Topologien finden sich in der Literatur ([HTC04], [Gar02]).

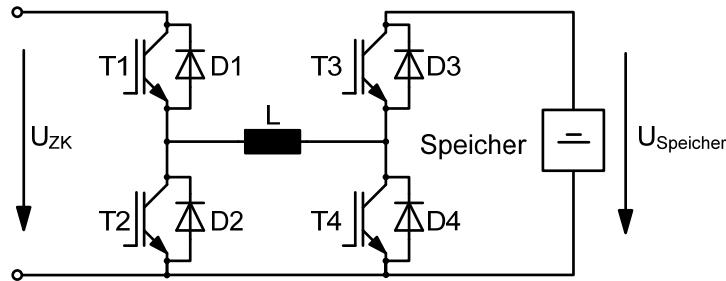


Abbildung 2-10: Bidirektonaler DC/DC-Wandler

Zu beachten ist, dass aus Gründen der sicheren Speicherauslegung gegebenenfalls eine galvanische Trennung von Zwischenkreis und Energiespeicher notwendig wird, damit die Isolationsfestigkeit des Energiespeichers und seiner Komponenten nicht überschritten wird. Eine Lösung besteht in der Verwendung eines Transformators, welche über einen DC/AC-Wandler an den Zwischenkreis und über einen AC/DC- Wandler an den Energiespeicher gekoppelt wird (Abbildung 2-11).

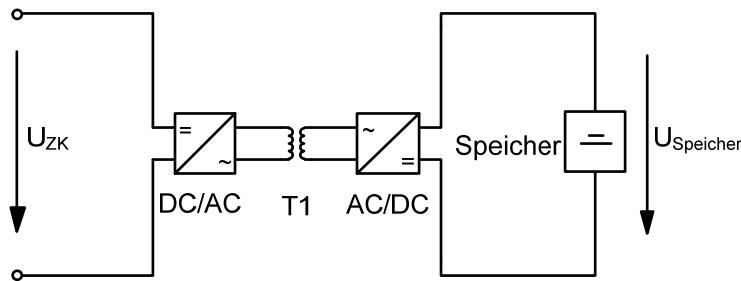


Abbildung 2-11: Alternative Speicheranbindung mit galvanischer Trennung über Transformator

Weitere Anbindungsmöglichkeiten

Neben den genannten Systemen ist auch die Anbindung des Speichers hinter den Hilfsbetriebsumrichter der Lokomotive beziehungsweise in die Zugenergieversorgung auf den Wagen möglich. Erstere zeichnet sich dabei durch ein geringeres Spannungsniveau gegenüber dem Zwischenkreis aus. Die Nachteile aufgrund der Restriktionen in der Leistungsaufnahme und -abgabe durch den unidirektionalen Hilfsbetriebumrichter mit beschränkter Leistung überwiegen jedoch.

Die Installation von Energiespeichern auf den Wagen ist dann attraktiv, wenn der Platzbedarf auf der Lokomotive für den gewünschten Speicher nicht ausreicht. Die Anbindung kann dabei über den Zwischenkreis des Bordnetzumrichters erfolgen. Nachteilig ist neben der begrenzten Zug-sammelschienenleistung hier vor allem die notwendige Kommunikationsschnittstelle zwischen den Wagen und der Lokomotive. Diese wird für ein effektives Lastmanagement benötigt, schränkt jedoch die Flexibilität der Zugbildung durch die fehlende Kompatibilität zu anderen Fahrzeugen ein. Eine solche Informationsschnittstelle kann beispielsweise eine Rekuperationsinformation sein, welche eine günstige Rückspeisungsmöglichkeit auf dem Fahrzeug anzeigt („Leistungsüberschuss“) bzw. in Beschleunigungsphasen eine verringerte Leistungsaufnahme von den Wagen anfordert [SW10a]. Die Nachrüstung eines solchen Systems über Funkübertragung ist wegen der nicht not-

wendigen Nachrüstung von elektrischen Leitungen und der geringen Beeinflussung des Systems denkbar.

Die genannten Anbindungsmöglichkeiten wurden in einer Masterarbeit ([Ngu11], S. 27) über eine gewichtete Punktbewertung anhand der Kriterien Ladefähigkeit, mögliche Energieverwertung, Systemkosten, Zusatzmasse, verfügbares Volumen, Flexibilität und mögliches Verlustmanagement mit der Direktanbindung über den DC-Zwischenkreis verglichen. Dabei hat sich die Anbindung über den DC-Zwischenkreis wegen der genannten Beschränkungen der weiteren Anbindungsmöglichkeiten mit deutlichem Vorsprung als geeignetste Lösung herausgestellt.

Zusammenfassung

Als geeignetste Anbindungsmöglichkeit von Speichersystemen auf der dieselelektrischen Streckenlokomotive stellt sich die Anbindung über DC/DC-Wandler an den DC-Zwischenkreis heraus. Diese Anbindung bietet die größte Flexibilität in der Anwendung und die größten Leistungsreserven für die Speicherladung und -entladung. Für die Speicherapplikation bei begrenztem Einbauraum- und Zusatzmasse auf der Lokomotive ist weiterhin die zusätzliche Anbindung von elektrischen Speichern an den DC-Zwischenkreis der Wagen zweckmäßig. Die hier getroffenen Aussagen gelten nur für die untersuchte Fahrzeugkonfiguration und müssen für andere Fahrzeugtypen bzw. einen abweichenden Einsatzzweck neu geprüft werden.

3 Modellbildung und Simulation

3.1 Zielstellung

Bei der Untersuchung von Strategien für die verbrauchseffiziente Fahrt und den optimalen Speicherbetrieb wird eine Simulationsumgebung benötigt, welche sowohl die Zuglaufsimulation als auch die entstehenden Energieflüsse im Fahrzeug abbildet. Die Einbindung der Speichersysteme Doppelschichtkondensator und Li-Ionen-Batterie stellen dabei eine Erweiterung gegenüber dem Stand der Technik dar. Die wichtigsten Ergebnisgrößen des Berechnungswerkzeugs sind die erreichte Fahrzeit, der Kraftstoffverbrauch und der Energieumsatz im Speicher.

Das Kapitel beginnt mit dem der Zusammenstellung der Grundlagen zur Fahrdynamik von Schienenfahrzeugen. Anschließend erfolgt eine Untersuchung der Berechnungsmethoden zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs und der möglichen Simulationsumgebungen. Nach der Auswahl der geeigneten Werkzeuge wird ein Simulationsansatz aufgestellt. Die Abbildung der einzelnen Elemente des Antriebssystems und der Energiespeicher anhand von Gleichungen und Berechnungsvorschriften wird nachfolgend dargelegt. Weiterhin werden die Verknüpfung der Elemente und die Umsetzung der Berechnung erläutert. Den Abschluss bildet die Validation des Fahrzeugmodells an Hand von Fahrzeugmessungen mit einer dieselelektrischen Lokomotive auf der Strecke Hamburg-Cuxhaven. Das entstehende Programm zur energetischen Simulation von dieselelektrischen Lokomotiven im Zugverband wird als Hybrid Train Optimizer bezeichnet.

3.2 Fahrdynamik von Schienenfahrzeugen

Die Abbildung der realen Fahrdynamik ist wesentlich für die korrekte energetische Bilanzierung des Systems, da sowohl die Fahrzeit als auch die Fahrwiderstände maßgeblich beeinflusst werden. Die Fahrdynamikgrundlagen sind in Standardwerken, z. B. [Wen03], ausführlich beschrieben und werden mit empirisch ermittelten Gleichungen und Richtwerten aus der Praxis unterfüttert. Die Bewegung wird als eindimensionale Bewegung des Fahrzeugs auf dem Linienzug abgebildet, da die Spurführung in normalen Betriebsphasen gesichert und die Quer- und Vertikaldynamik von untergeordneter Bedeutung ist. Die Beschleunigung a ergibt sich aus der dynamischen Masse des Wagenzuges $m_{\text{ges,dyn}}$, der antreibenden Zugkraft F_T , der Bremskraft F_B und dem Fahrwiderstand F_W , bestehend aus dem Streckenwiderstand $F_{W,\text{St}}$ und dem Fahrwiderstand des Wagenzugs $F_{W,\text{ZUG}}$ nach der Bewegungsgleichung:

$$a(t, s, v) = \frac{F_T - F_B - F_{W,\text{St}} - F_{W,\text{ZUG}}}{m_{\text{ges,dyn}}}. \quad (3.1)$$

Die Fahrgeschwindigkeit v_1 und die Position des Fahrzeugs s_1 zum Zeitpunkt t_1 können durch Integration ermittelt werden:

$$v_1 = \int_{t_0}^{t_1} adt + v_0 \quad \text{und} \quad s_1 = \int_{t_0}^{t_1} vdt + s_0. \quad (3.2)$$

Eine kurze Erläuterung der für die Beschreibung der Zugbewegung wichtigen Elemente wird im Folgenden gegeben.

3.2.1 Fahrzeugmasse

Die Masse der Lokomotive m_{LOK} und des Wagenzuges mit einer Anzahl Wagen n_{WAG} mit einer bestimmten Masse m_{WAG} werden durch einen Massepunkt abgebildet:

$$m_{\text{ges}} = m_{\text{LOK}} + n_{\text{WAG}} \cdot m_{\text{WAG}}. \quad (3.3)$$

Insbesondere bei langen Güterzügen mit verschiedenen Wagentypen und unterschiedlichen Beladungszuständen kann die Beschreibung über verteilte Massepunkte (Massebandmodell) hilfreich sein. Bei der Abbildung von Personenzügen geringer Länge wird dieser Zusammenhang in der Regel vernachlässigt.

Die Radaufstandskraft ist für geringe Steigungen näherungsweise gleich der Gewichtskraft. Die Gewichtskraft der Lok $F_{G,\text{LOK}}$ ist für die übertragbare Zugkraft entscheidend. Zusammen mit der Gewichtskraft der Wagen $F_{G,\text{WAG}}$ beeinflusst sie weiterhin maßgeblich die Fahrwiderstände. Es gelten:

$$F_{G,\text{LOK}} = m_{\text{LOK}} \cdot g \quad \text{und} \quad F_{G,\text{WAG}} = m_{\text{WAG}} \cdot g. \quad (3.4)$$

Die für die Zugbeschleunigung relevante dynamische Masse ergibt sich über den dynamischen Massefaktor ξ , welcher die Trägheit der Räder, Antriebsachsen und Fahrmotoren repräsentiert:

$$m_{\text{ges,dyn}} = m_{\text{LOK}} \cdot \xi_{\text{LOK}} + n_{\text{WAG}} \cdot m_{\text{WAG}} \cdot \xi_{\text{WAG}}. \quad (3.5)$$

3.2.2 Zug- und Bremskraft

Das Beschleunigungsvermögen eines Fahrzeugs kann über das Zugkraftdiagramm abgebildet werden, welches die antreibende Zugkraft über der Fahrgeschwindigkeit angibt. Die übertragbare Zugkraft F_{RS} ist sowohl bei Beschleunigungs- als auch bei Bremsvorgängen über den Rad-Schiene-Kontakt limitiert. Dieser wird über den ausgenutzten Kraftschlussbeiwert μ beschrieben, der als konstant angenommen oder in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit v angegeben werden kann. Bei Lokomotiven sind in der Regel alle Achsen angetrieben und die Achsen weisen die gleiche Achslast auf, damit kann für den Betrag der zulässigen Kraft im Rad-Schiene-Kontakt $F_{\text{RS,max}}$ vereinfacht

$$F_{\text{RS,max}} = F_{G,\text{LOK}} \cdot \mu(v) \quad (3.6)$$

angesetzt werden. Weiterhin gilt für Beschleunigungsvorgänge eine Beschränkung der Zugkraft durch die maximal zur Verfügung stehende Leistung am Rad $P_{\text{Rad,max}}$ in Abhängigkeit von der Leistung der VKM $P_{\text{VKM,max}}$, der benötigten Leistung der Hilfsmaschinen P_{HM} und der Hilfsanlagen P_{HA} . Die Wirkungsgradkette ist geschwindigkeits- und lastpunktabhängig. Die maximale Zugkraft am Rad $F_{T,\text{max}}$ ist umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit:

$$F_{T,\text{max}}(v) = \min \left[\frac{P_{\text{Rad,max}}(v, P_{\text{VKM,max}}, P_{\text{HA}}, P_{\text{HM}})}{v}, F_{\text{RS,max}}(v) \right]. \quad (3.7)$$

Somit ergibt sich ein Zugkraftdiagramm wie in Abbildung 3-1 dargestellt.

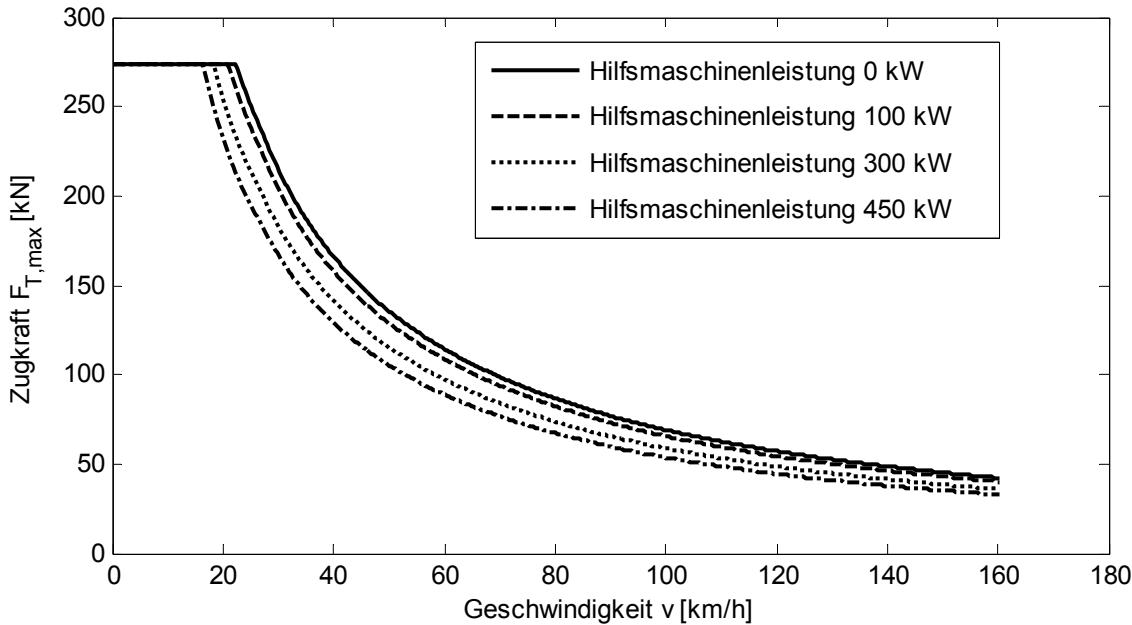


Abbildung 3-1: Zugkraftkennfeld bei variierender Hilfsmaschinenleistung

Bei der Auslegung der Bremse müssen zur Absicherung des Bremsvermögens wesentlich niedrigere Haftbeiwerte als für die Traktion angesetzt werden.

3.2.3 Zugwiderstand

Der Zugwiderstand $F_{W,ZUG}$ kann durch einen Grundwiderstand (coulombsche Reibung in den Lägern, Rollreibung der Räder) $F_{W0,ZUG}$, dem geschwindigkeitsproportionalen Fahrwiderstand (Walkwiderstand, viskose Reibung, Luftimpulswiderstand) $F_{W1,ZUG}$ und dem quadratisch eingehenden Luftwiderstand $F_{W2,ZUG}$ approximiert werden:

$$F_{W,ZUG}(v) = F_{W0,ZUG} + F_{W1,ZUG} \cdot v + F_{W2,ZUG} \cdot (\Delta v + v)^2 + F_{W,ZUG,Anfahr}. \quad (3.8)$$

Der Ausdruck Δv steht für den Anteil der Windgeschwindigkeit, der frontal entgegen der Fahrrichtung auf das Fahrzeug einwirkt. Die Definition eines erhöhten Anfahrwiderstands $F_{W,ZUG,Anfahr}$ kann den erhöhten Fahrwiderständen beim Anfahren durch die Haftriebung Rechnung tragen. Die Veränderungen der Fahrwiderstände im Tunnel sind ggf. besonders zu betrachten. Die Beiwerte können aus Ausroll- bzw. Fahrversuchen oder Werten aus der Literatur gewonnen werden.

Bei Lokomotiven kann nach WENDE ([Wen03], S. 151) davon ausgegangen werden, dass die geschwindigkeitsproportionale Reibung sehr klein ist. Bei einigen Wagenzugwiderstandsgleichungen wird der Wert hingegen berücksichtigt. Allgemein ergibt sich der gesamte Zugwiderstand demnach aus der Summe des Zugwiderstandanteils der Lok $F_{W,LOK}$ und der Wagen $F_{W,WAG}$:

$$\begin{aligned}
 F_{W,LOK} &= f_{W0,LOK} \cdot F_{G,LOK} + f_{W2,LOK} \cdot F_{G,LOK} \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{v_0} \right)^2, \\
 F_{W,WAG} &= f_{W0,WAG} \cdot F_{G,WAG} + f_{W1,WAG} \cdot F_{G,WAG} \cdot \left(\frac{v}{v_0} \right) + f_{W2,WAG} \cdot F_{G,WAG} \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{v_0} \right)^2, \\
 F_{W,ZUG} &= F_{W,LOK} + F_{W,WAG}.
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

3.2.4 Streckenhöchstgeschwindigkeit und Streckenwiderstände

Die Streckenwiderstände werden über die ortsbezogene Angabe von Steigungen und Bogenradien determiniert. Geschwindigkeitsbeschränkungen limitieren den möglichen Geschwindigkeitsverlauf unabhängig vom Fahrer. Ein reales Geschwindigkeitsprofil mit Angaben zu Bogenradien und mittleren Steigungen ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

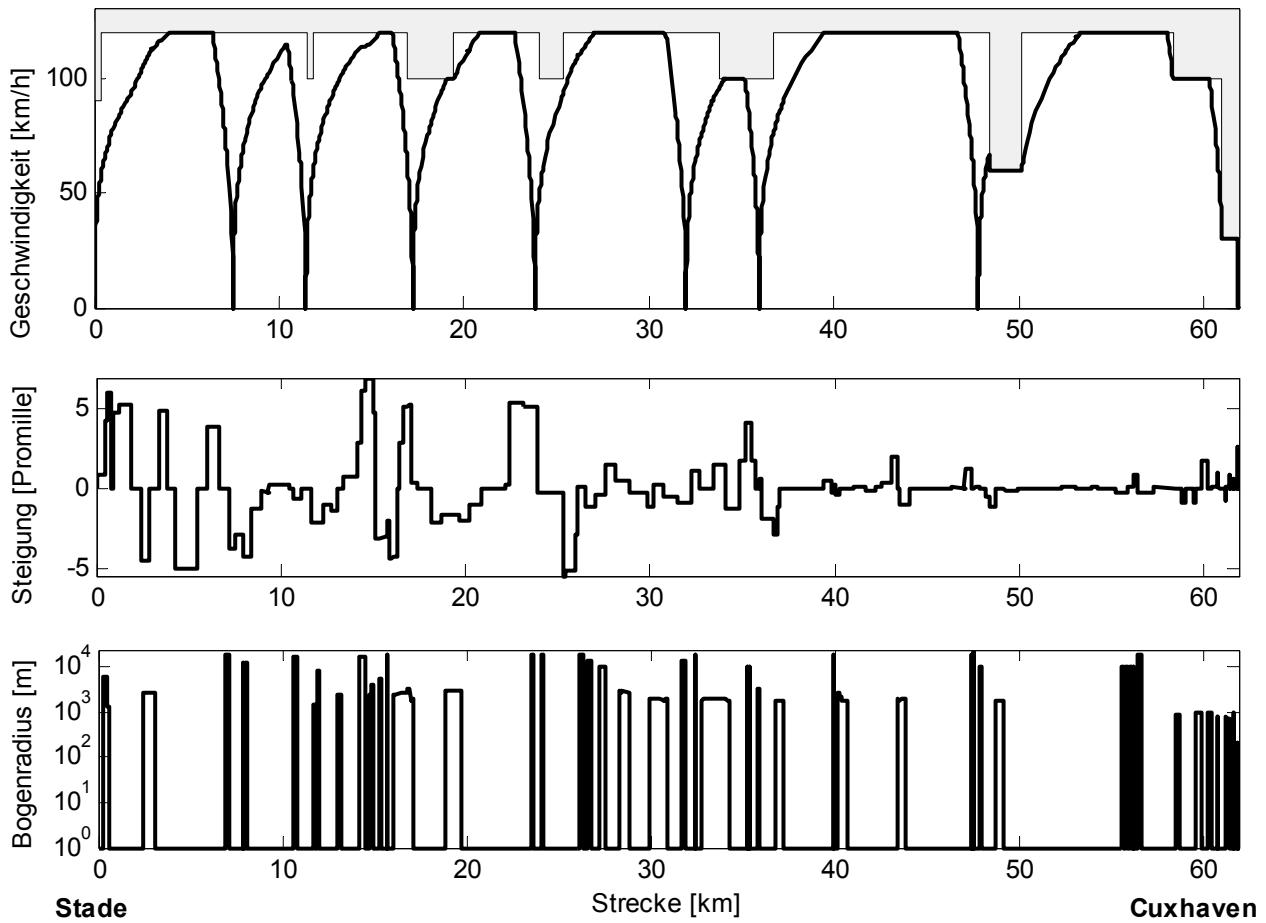


Abbildung 3-2: Streckenprofil mit realen Streckendaten (Stade-Cuxhaven) und eingezeichnetem Fahrverlauf der schnellsten Fahrt

Der streckenabhängige Fahrwiderstand $F_{W,St}$ setzt sich aus dem Steigungswiderstand F_N und dem Bogenwiderstand F_{Bo} zusammen:

$$\begin{aligned}
 F_{W,St} &= F_N + F_{Bo}, \\
 \text{mit } F_N &= F_{G,ZUG} \cdot i_N \quad \text{und} \quad F_{Bo} = f(F_{G,ZUG}, r_{Bo}).
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Sowie die Berechnung des Steigungswiderstands über die mittlere Längsneigung i_N aus physikalischen Grundgleichungen folgt, können auch die Bogenwiderstandskomponenten als physikalische Phänomene beschrieben werden. Für Berechnungen in der Praxis werden jedoch Gleichungen benutzt, die auf empirisch-statistischer Grundlage ermittelt worden sind. So wird bei Berechnungen der DB beispielsweise folgende Gleichung verwendet ([Wen03], S. 107):

$$F_{Bo} = F_{G,ZUG} \cdot \frac{k}{r_{Bo} - \Delta R}, \quad (3.11)$$

mit $k=0,65$ m und $\Delta R=55$ m für $r_{Bo} \leq 300$ m und $k=0,5$ m und $\Delta R=30$ m für $r_{Bo} > 300$ m.

3.2.5 Berechnung der schnellstmöglichen Fahrt

Zur Lösung der Fahraufgabe unter den gegebenen Restriktionen gibt es viele Möglichkeiten. Der Fahrstil des Fahrers ist dabei bedeutend für die Fahrzeit, den Kraftstoffverbrauch und den Komfort der Passagiere. Als Referenz wird oft die schnellste Fahrt bei maximaler Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Zugkraft F_T unter Einhaltung der ortsabhängigen Maximalgeschwindigkeit $v_{\max}(s)$ und einer maximal zulässigen Bremsverzögerung $a_{B,\max}$ ermittelt:

$$F_{RS}(s, a_{B,\max}) = \max_{\substack{F_{RS} \leq F_{T,\max}(v) \\ a \leq a_{B,\max}}} \left\{ F_{RS}[v(s), a] \right\} \quad (3.12)$$

mit $v(s) \leq v_{\max}(s)$.

Das Ergebnis der Berechnung ist die Fahrt mit kürzester Fahrzeit. Die Optimierung der Fahrt hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs unter Berücksichtigung der Fahrzeitreserve wird in Abschnitt 4.3 vorgestellt.

3.3 Verfahren zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs

Die Einführung neuartiger Systeme zur Energieverbrauchssenkung kann nur unter Einsatz von Entwicklungs- und Materialkosten durchgeführt werden. Daher besteht der Wunsch, die Kraftstoffeinsparung der Maßnahmen im Vorhinein abzuschätzen, um in der Entwicklungsphase die Maßnahmen richtig bewerten zu können und dem Kunden die erwartete Einsparung bei ggf. steigenden Investitionskosten darzustellen. Im Folgenden soll ein Überblick über den Stand der Technik für Verfahren zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs gegeben werden.

3.3.1 Berechnung des Differenzverbrauchs über die Differenzleistungsmethode

Für die Berechnung des Mehrverbrauchs durch Erhöhung bzw. Reduzierung des Leistungsbedarfs in einem bestimmten Fahrzustand kann bei einer gleichbleibenden Motordrehzahl die Differenzleistungsmethode benutzt werden. Dieses Verfahren ist aus der Automobilindustrie bekannt. Damit kann die Kraftstoffverbrauchsdifferenz durch Veränderung der Masse, der Hilfsanlagenleistung oder des Strömungswiderstandskoeffizienten für einen bestimmten Fahrzustand bestimmt werden [RB96]. Das Verfahren beruht darauf, dass der Mehrverbrauch der VKM an Kraftstoff $d\dot{m}_{Kr} / dP$ bei gleichbleibender Drehzahl über weite Lastbereiche konstant ist. Der Differenzverbrauch $\Delta\dot{m}_{Kr}$ eines Lastspiels ergibt sich über:

$$\Delta m_{Kr} = \int_{t_0}^{t_f} \frac{dm_{Kr}}{dP}(n) \cdot \Delta P dt. \quad (3.13)$$

Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass bei bekanntem Streckenkraftstoffverbrauch für ein Fahrzeug der Einfluss einer kleinen Änderung in der Fahrzeugkonfiguration sehr gut bestimmt werden kann. Es entfällt dabei der Aufbau einer kompletten Fahrzeugsimulation. Im Vergleich zur experimentellen Bestimmung der Verbrauchsdifferenz wird das Problem umgangen, dass bei geringen Einsparungen die Validation der Kraftstoffeinsparung selbst unter Prüfstandsbedingungen sehr schwierig ist, da diese nur durch längere Testreihen zu verifizieren sind.

Für serielle dieselelektrische Antriebsstränge ist das Verfahren bei Dieselmotor-Generatorsätzen mit Konstantdrehzahl sehr gut geeignet, wie sie z. B. in Baumaschinen und Hafenmobilkränen zu finden sind. Bei Antrieben mit variabler Drehzahl ist die Genauigkeit des Verfahrens schlechter, da sich die Generatordrehzahl typischerweise mit der Lastanforderung ändert. Für Überschlagsberechnungen ist das Verfahren trotzdem geeignet, da auch bei Verwendung typischer Generatorkurven der Verbrauchsanstieg unterhalb der Vollast über weite Bereiche konstant ist (Abbildung 3-3).

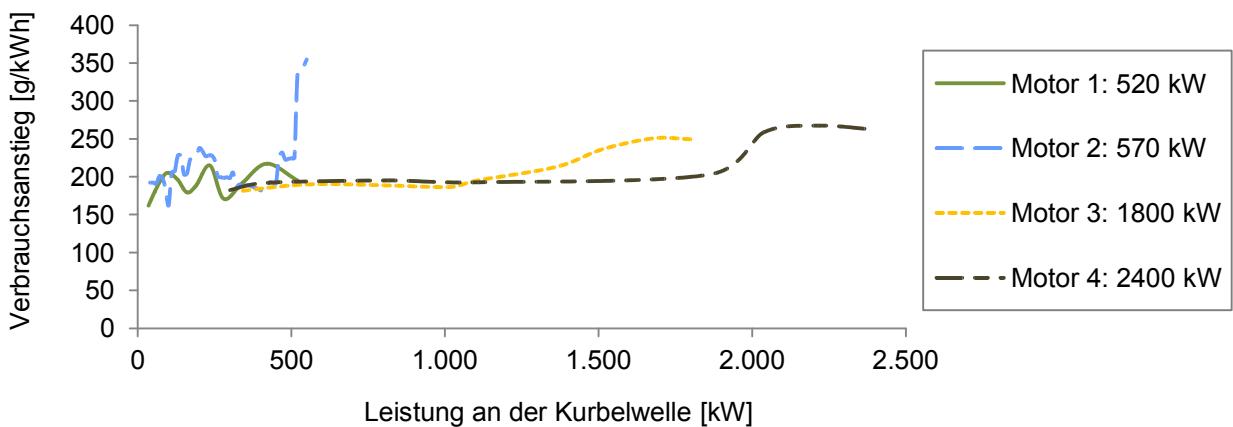


Abbildung 3-3: Darstellung des Verbrauchsanstieg über der Leistung für vier ausgewählte Dieselmotoren unterschiedlicher Leistung ($P \sim n^3$ -Lastkurven, [BT10])

3.3.2 Berechnung des Verbrauchs für Lastkollektive

Aufgrund der nicht genormten Referenzstrecken im Schienenfahrzeugsektor werden zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs oftmals Lastkollektive verwendet. Dabei werden typische Fahrsituationen klassifiziert und gewichtet. Die Bezugsgrößen können dabei unterschiedlich sein. Die bezogen auf den Rechenaufwand aufwändigste Bezugsgröße stellt die Angabe einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit mit Spezifikation der Betriebssituation dar. Für die Berechnung der Fahrwiderstände muss zuerst die aufzubringende Leistung am Rad P_{Rad} über die Fahrwiderstände F_W und die Beschleunigungskraft F_a des kompletten verlustbehafteten Antriebsstrangs bis zu dem Betriebszustand des Gensets gerechnet werden:

$$P_{\text{Rad}} = (F_W + F_a) \cdot v. \quad (3.14)$$

Die benötigte vom Generator aufzubringende Zwischenkreisleistung $P_{\text{GEN,DC}}$ ist bei Berücksichtigung des Antriebsmaschinenverlustes η_{Antrieb} , welcher die Verluste in den Pulswechselrichtern, den

Fahrmotoren und dem Getriebe repräsentiert, und der Leistung der Hilfsanlagen P_{HA} über die Beziehung

$$P_{\text{GEN,DC}} = \frac{P_{\text{Rad}}}{\eta_{\text{Antrieb}}(\nu, P_{\text{Rad}})} + P_{\text{HA}} \quad (3.15)$$

zu bestimmen. Die von der VKM an der Welle abgegebene Leistung kann nun über den Gesamtwirkungsgrad des Generators mit nachgeschaltetem Gleichrichter $\eta_{\text{GEN,ges}}$ und die Leistungsaufnahme der Hilfsmaschinen P_{HM} berechnet werden:

$$P_{\text{VKM}} = \frac{P_{\text{GEN,DC}}}{\eta_{\text{GEN,ges}}(P_{\text{GEN}})} + P_{\text{HM}}. \quad (3.16)$$

Über den spezifischen Verbrauch b_e der VKM wird nun der Kraftstoffmassenstrom ermittelt. Im spezifischen Verbrauch sind die von der Drehzahl n_{VKM} und dem Lastpunkt P_{VKM} abhängigen Motorverluste und der untere Heizwert des Kraftstoffs enthalten:

$$\dot{m}_{\text{Kr}} = P_{\text{VKM}} \cdot b_e(n_{\text{VKM}}, P_{\text{VKM}}). \quad (3.17)$$

Die Fahrzustände werden zumeist zeitlich gewichtet. Der äquivalente fahrzeitbezogene Kraftstoffverbrauch ergibt sich bei n betrachteten Fahrzuständen und einer relativen Häufigkeit $b_{\text{rel},i}$ über:

$$\overline{\dot{m}_{\text{Kr}}} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_{\text{Kr},i} \cdot b_{\text{rel},i} \quad \text{mit } t_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n t_i \text{ und } b_{\text{rel},i} = \frac{t_i}{t_{\text{ges}}}. \quad (3.18)$$

Ein Vergleich der Effizienz von Dieselmotoren kann auch direkt über Motorlastkollektive erfolgen. Diese können mit Hilfe von Messdaten bestehender Zugkonfigurationen bzw. der Simulation erzeugt werden und ermöglichen eine einfache und nachvollziehbare Analyse des Kraftstoffverbrauchs. Ein Beispieldastkollektiv ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Dieses stammt aus der Auswertung der Messfahrten auf der Strecke Hamburg - Cuxhaven (siehe Abschnitt 2.4). Eine Zusammenstellung der Lastprofile verschiedener Betreiber und Firmen für unterschiedliche Fahrzeug- und Betriebsklassen ist in [KB03] zusammengetragen. Die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs ist nun ausgehend von Gleichung (3.17) auszuführen. Bei k diskreten Lastzuständen kann der Gesamtverbrauch m_{Kr} bei einer bestimmten Betriebsdauer t_{Betrieb} wie folgt berechnet werden:

$$m_{\text{Kr}} = \left(\sum_{i=1}^k \dot{m}_{\text{Kr},i} \cdot b_{\text{rel},i} \right) \cdot t_{\text{Betrieb}}. \quad (3.19)$$

Anhand von Lastkollektiven ist die Abschätzung des Kraftstoffverbrauchs von Antriebssträngen mit nur einem Energiespeicher möglich [GS07]. Diese umfassen z. B. Elektrofahrzeuge bzw. die Ausgangskonfiguration der dieselelektrischen Lokomotive ohne elektrischen Speicher. Nachteilig bei dem Verfahren ist, dass nur die Traktion betrachtet wird. Für die Ermittlung des Rekupurationspotentials in Bremsphasen müssten zusätzliche Daten erfasst und berücksichtigt werden. In jedem Fall geht jedoch der zeitliche Verlauf der Leistungsanforderung verloren. Dies macht eine qualifizierte Berechnung von Energiemanagementstrategien oder die Berechnung der natürlichen

bzw. Speicherrekuperation unmöglich. Für die Berechnung von Fahrzeugen mit einem zusätzlichen Energiespeicher für die Rekuperation von Bremsarbeit ist das Verfahren deshalb nicht geeignet.

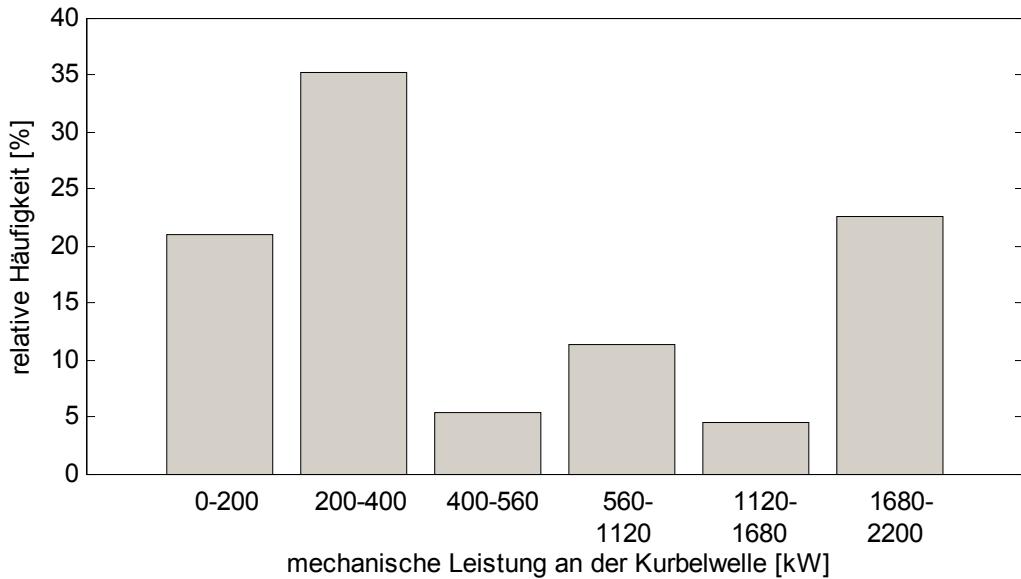


Abbildung 3-4: Dieselmotorlastprofil auf der Strecke Hamburg – Cuxhaven (bezogen auf Kurbelwelle)

3.3.3 Berechnung des Verbrauchs für Strecken mithilfe von quasistatischen Verfahren

Die Berechnung von Fahrzeit- und Kraftstoffverbrauch erfolgt auf makroskopischer Ebene zu meist über quasistatische Verfahren. Unter Annahme von quasistatischen Zuständen ist eine Rückwärtsrechnung der Leistungsanforderungen aus einer Fahraufgabe oder einem Bewegungsprofil ohne Einbeziehung eines Fahrerreglers möglich. WÄLTERMANN [Wäl00] bezeichnet diese Vorgehensweise als Effect-Cause-Simulation, da von der entstehenden Bewegung auf die auftretenden Leistungen im Antriebssystem zurückgerechnet wird (Abbildung 3-5). Der Begriff quasistatisch bezieht sich in diesem Zusammenhang darauf, dass die Änderung der Eingangsgrößen des Systems u (hier oft die Geschwindigkeit) gegenüber der Änderung der inneren Zustandsgrößen x langsam erfolgt. Somit ist das System immer nahe dem Gleichgewichtszustand und die für dynamische Systeme geltende Beschreibung der Ableitung der Zustandsgrößen \dot{x} und der Ausgangsgrößen y

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u) \\ y &= f(x, u)\end{aligned}\tag{3.20}$$

kann durch Berechnung oder Messung des von den Eingangsgrößen abhängigen Gleichgewichtszustands $x_{\text{stat}} = f(u)$ in ein Gleichungssystem

$$y_{\text{stat}} = f(u)\tag{3.21}$$

überführt werden.

Es ist zu beachten, dass Systeme mit Energiespeichern per Definition kein statisches System darstellen können. Werden derartige Systeme mit der Methodik berechnet, so erhält man ein partiell

dynamisches System, weil der „Ladezustand“ als innerer Systemzustand eine Auswirkung auf die Ausgangsgrößen, wie beispielsweise den Kraftstoffverbrauch hat.

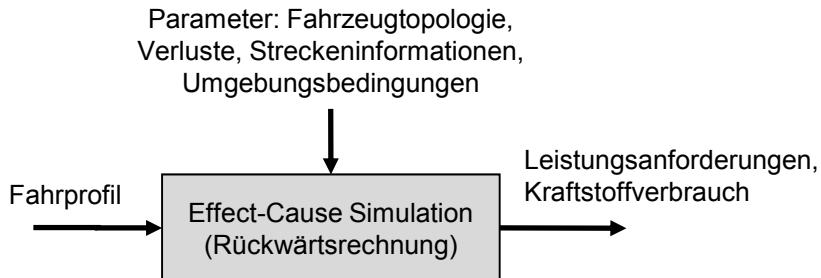


Abbildung 3-5: Schema Rückwärtssimulation

Bei der Effect-Cause Simulation müssen das Streckenprofil und die Fahrtrajektorie für die Bewältigung der Fahraufgabe bekannt sein. In Frage kommen dafür zweckmäßigerweise Aufzeichnungen aus realen Fahrten mit gleichen oder vergleichbaren Fahrzeugen auf einer Strecke mit vergleichbarem Strecken- und Einsatzprofil. Diese haben den Vorteil, dass das reale Fahrverhalten von Fahrgästen bereits in der Information enthalten ist. Dies ist nur repräsentativ, wenn mehrere Messfahrten aufgenommen wurden und sich ein „typisches“ Verhalten herauskristallisiert. Durch den Vergleich statistischer Kenngrößen kann aus diesen Daten eine repräsentative Fahrt ausgewählt werden.

Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung vorgegebener Fahrprofile aus Normen. In der Kraftfahrzeugtechnik kann der Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen in bestimmten Fahrzyklen, z. B. dem Neuen Europäischen Fahrzyklus, verglichen werden [EWG70]. Dies ist in der Schienenfahrzeugtechnik unüblich, da sowohl die Leermasse als auch die typische Beladung der Fahrzeuge sehr stark schwanken und anders als bei Kfz die auftretenden Randbedingungen im jeweiligen Einsatzgebiet (Regionalverkehr, Fernverkehr etc.) bekannt sind. Das Einsatzgebiet des Kraftfahrzeugs ist nicht definiert und die zu erreichenden Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sind in der Regel durch andere Verkehrsteilnehmer determiniert, so dass auch für leistungsstarke Fahrzeuge das „Ausfahren“ der Höchstgeschwindigkeit nicht immer machbar ist.

Mit den genannten Verfahren sind eine Anpassung der Fahrtrajektorie¹⁹ für neue Strecken, die Veränderung der zulässigen Geschwindigkeit, ein anderes Halteregime oder leistungsstärkere Fahrzeuge nicht möglich. Unter Berücksichtigung der Restriktionen kann ein Fahrdynamikprogramm mit den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Grundlagen der Fahrdynamik einen Fahrtverlauf erstellen.

Unter Rückrechnung der Fahrwiderstände und der zur Beschleunigung notwendigen Zugkraft kann nun über die Formeln (3.14) bis (3.17) der Kraftstoffmassenstrom bestimmt werden. Durch Zeitintegration ergibt sich der Gesamtverbrauch m_{K_r} zu:

¹⁹ Der Begriff Fahrtrajektorie lehnt sich an die Planung von Bahnkurven (Trajektorien) an. Er wird hier gleichbedeutend zu dem in der Bahntechnik häufig verwendeten Begriff Fahrschaubild verwendet.

$$m_{Kr} = \int_{t_a}^{t_e} \dot{m}_{Kr} dt. \quad (3.22)$$

Vorteil des Verfahrens ist die hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit, welche insbesondere vorteilhaft für die Optimierung ist. Die entstehenden Fahrprofile sind direkt miteinander vergleichbar, da ein für eine bestimmte Konfiguration ungünstig parametrierter Fahrerregler das Ergebnis nicht verfälschen kann.

Gemessene Fahrprofile für das betrachtete Fahrzeug wurden bei Messfahrten aufgenommen, diese beinhalten bereits das dynamische Verhalten des Systems und können als Input genutzt werden. Die Fahrdynamiksimulation kann mit den gemessenen Fahrprofilen bezüglich der Ergebnisse validiert werden. Damit können auch generische Profile erzeugt werden, die dem realistischen Verhalten entsprechen.

Nachteil des Verfahrens ist, dass dynamische Vorgänge bei der Leistungsbereitstellung von Energiequellen nur bei mehreren Freiheitsgraden darstellbar sind. So kann man beispielsweise einen verzögerten Leistungsaufbau durch eine VKM abbilden, wenn man unterstellt, dass ein Energiespeicher die daraus resultierenden steigenden Leistungsanforderungen darstellen kann.

Die Durchführbarkeit der Fahrtrajektorie unter den gegebenen Randbedingungen muss im Vorfeld sichergestellt werden. Wird ein nicht zulässiger Lastzustand in der Rückwärtsrechnung erkannt, ist die Simulation abzubrechen und das Fahrprofil entsprechend anzupassen. In keinem Fall eignet sich ein solches System zur Abbildung von Regelkreisen von Teilkomponenten, da die Rückwirkung eines Reglers auf das System nicht zuverlässig dargestellt werden kann [GA99].

3.3.4 Dynamische Modelle

Die detailgetreuste Art der Abbildung des Systems ist die Analyse mit Hilfe von reinen Vorwärtsmodellen (Abbildung 3-6). Vorteile sind die bessere Abbildung des realen Systems durch die Simulation dynamischer Vorgänge und die Berücksichtigung der physikalischen Rückwirkungen. Dies betrifft beispielsweise die Modellierung des Motorhochlaufs bzw. der Dynamik von Bremssteuerungen. Mit dem Verfahren ist die Auslegung von Reglerstrukturen in verschiedenen Detaillierungsebenen möglich. Ein Nachteil des Verfahrens ist die Schwierigkeit des genauen Einhaltens von Randwerten, wie z. B. das genaue Einhalten der Fahrzeit bei Halt im Bahnhof. Weiterhin sinkt die Simulationsgeschwindigkeit je nach Größe des abgebildeten Frequenzbereichs rapide ab. Die Parametrierung der notwendigen Reglerstrukturen ist außerdem aufwändig und kann bei fehlerhafter Abbildung zu schlechten Simulationsergebnissen führen.

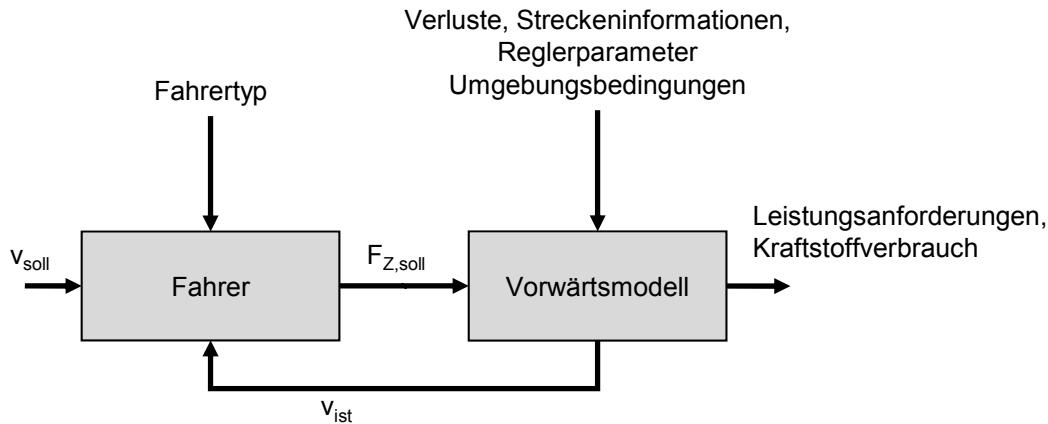


Abbildung 3-6: Schema Vorwärtssimulation

3.3.5 Zusammenfassende Bewertung

Im Folgenden sollen nur die Varianten untersucht werden, welche die Möglichkeit zur Evaluierung des absoluten Kraftstoffverbrauchs in Lastzyklen geben. Die Differenzleistungsmethode ist dafür ungeeignet, da nur der Relativverbrauch abgebildet werden kann. In Tabelle 3-1 werden die weiteren Methoden gegenübergestellt und bezüglich Ihrer Eignung verglichen.

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der Möglichkeiten zur Verbrauchsevaluation von Fahrzyklen

	Lastkollektive	Fahrzeitberechnung inkl. quasistatischer Verbrauchsrechnung	Vorwärtssimulation mit Zeitkonstanten (dynamisch)	Vorwärtssimulation mit physikalischer Abbildung (höhere Frequenzen)
Frequenzbereich	-	-	<10 Hz	< 10 kHz
rel. Rechenzeit	0,01	1	50	500
Parametrisierungsaufwand	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Qualität Verbrauchsrechnung	Eingeschränkt, je nach Ziel	gut (Stand der Technik)	sehr gut	sehr gut
Untersuchung Zugsteuerung	nicht möglich	gut	sehr gut	sehr gut
Untersuchung Energiespeicher	nicht möglich	gut (Verluste und Leistungsverhalten)	gut (Verluste und Leistungsverhalten)	sehr gut (Zusammenspiel mit Leistungselektronik)
Untersuchung Motorstopp	eingeschränkt, keine Dynamik	eingeschränkt, keine Dynamik	gut	sehr gut
Nachweis dynamischer Effekte	nicht möglich	nicht möglich	eingeschränkt	uneingeschränkt

Mit dem Fokus auf eine makroskopische Simulation kompletter Fahrzyklen und der Optimierung der Fahrweise und Fahrzeugparameter muss ein schnelles Simulationswerkzeug zur Verfügung stehen, das auch die Berechnung einer größeren Anzahl von Varianten ermöglicht. Weiterhin sollen

Parametervariationen über weite Bereiche vollautomatisch durchgeführt werden. Dies spricht gegen die Abbildung aufwändiger und z. T. fahrzeugspezifisch auszulegender Regelalgorithmen. Deswegen wird der Fahrzeitberechnung inklusive Verbrauchsrechnung über quasistatische Ansätze der Vorzug gegeben. Dynamische Modelle werden in dieser Arbeit zum Abprüfen verschiedener Teilsysteme genutzt, die Erfahrungen fließen in die Randbedingungen bei der Effect-Cause-Simulation ein.

3.4 Auswahl der Simulationsumgebung

Für die Darstellung der physikalischen Beziehungen und mathematischen Gleichungen bieten sich textbasierte Programmiersprachen, die signalflussbasierte Darstellung und die physikalische Abbildung an. Die Simulationsprogramme unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Anzahl der Arbeitsschritte der Modellbildung des technischen Systems von der Aufbereitung der Fragestellung bis zum aufbereiteten Simulationsergebnis, mit dem eine Problemlösung formuliert werden kann (Abbildung 3-7). Die Lösung der Gleichungen durch einen Rechenalgorithmus, die Kompilierung des Programms, die Ausführung der Berechnungen in der Hardware und die Aufbereitung der Ergebnisse in Form von lesbaren Daten werden in der Regel durch die Simulationswerkzeuge bereitgestellt. Einige Softwarewerkzeuge können jedoch ebenfalls die physikalische Beschreibung des realen Sachverhalts und das Aufstellen der Gleichungen übernehmen. Auf Seiten der Ergebnisaufbereitung können die Programme die Ergebnisse in geeigneten Datenformaten zusammenfassen und eine entsprechende Visualisierung anbieten. Die Wahl der selbstverantworteten Arbeitstiefe und des Programms ist von der Problemstellung abhängig und soll erläutert werden.

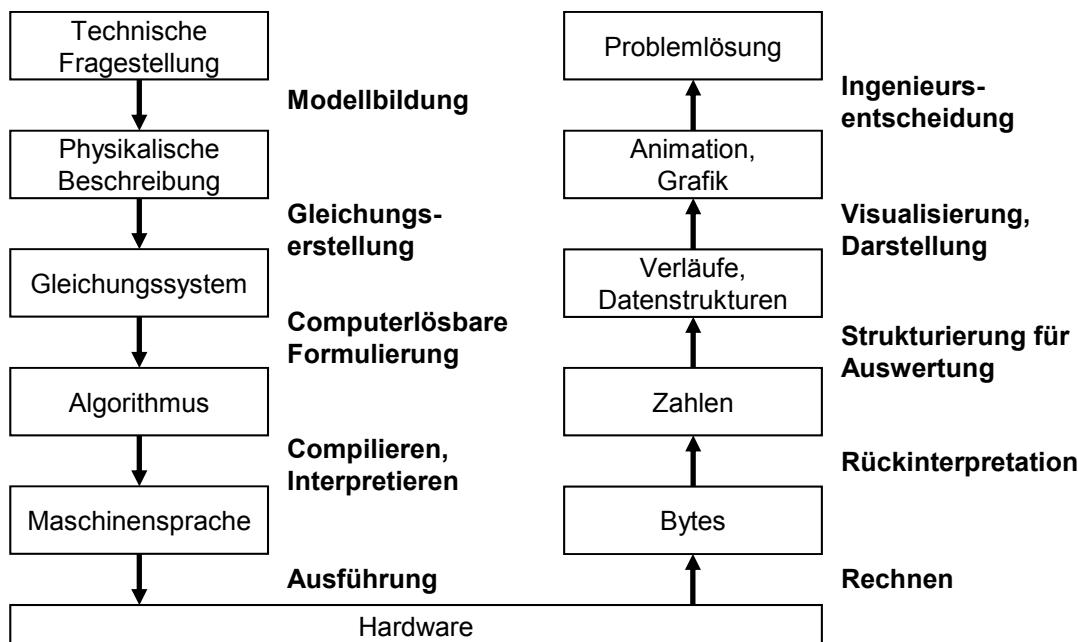


Abbildung 3-7: Arbeitsschritte für die Lösung von technischen Problemen mit Hilfe der Simulation
(nach [Bei06])

Folgende weitere allgemeine Anforderungen können an Simulationsprogramme formuliert werden:

- Einfache Handhabung,
- wenig Restriktionen bei der Implementierung,
- leistungsfähige Solver²⁰ (Genauigkeit, Rechengeschwindigkeit),
- Möglichkeit zur Stapelverarbeitung,
- Möglichkeit der Erstellung grafischer Benutzeroberflächen,
- Fähigkeit zur Co-Simulation,
- paralleles Rechnen und
- die Möglichkeit des Imports und Exports von Werten.

Diese aufgeführten Eigenschaften sind oft programmspezifisch und müssen abhängig vom Softwareprodukt geprüft werden.

3.4.1 Textbasierte Programmierung

Die textbasierte Programmierung in Hochsprachen wie C und C++ erfordert ein manuelles Aufstellen der Systemgleichungen und die computerlösbar Formulierung. Die Aufbereitung der Lösungen in einer geeigneten Form bleibt dem Nutzer überlassen. Programme wie MATLAB und verwandte frei verfügbare Programme (wie z. B. Octave oder Scilab) verfügen z. T. über integrierte Solver und vereinfachen die Implementierung der numerischen Mathematik [Obs08]. Weiterhin ist eine effiziente Nachbereitung der Ergebnisse in Form von Auswertungsskripten und vorbereiteten Grafikfunktionen gegeben.

3.4.2 Signalflussbasierte Programmierung

Signalflussbasierte Programme wie MATLAB/Simulink, die freie Software Scicos und LabVIEW ermöglichen die Zeitsimulation auf Basis der Repräsentation mathematischer Funktionen mit Hilfe graphischer Blöcke. Diese Blöcke können einfache mathematische Operationen darstellen, aber auch vorbereitete komplexere Funktionen aus der Signalverarbeitung oder der Regelungstechnik enthalten. Der Signalfluss ist immer determiniert und gerichtet. Deshalb müssen die Eingabe- und Ausgabegrößen im Vorhinein festgelegt werden und sind später nicht austauschbar. Es erfolgt eine automatische Aufbereitung der Beziehungen in eine für den Solver geeignete Form. Der Nutzer wird jedoch in der Regel nicht von der Pflicht der expliziten Darstellung der Berechnungsvorschriften entbunden. In MATLAB/Simulink steht eine große Anzahl leistungsfähiger Solver für verschiedene Problemklassen zur Verfügung.

²⁰ verbreiteter Fachbegriff aus dem englischen Sprachraum: Beschreibt einen auf Rechnern implementierten numerischen Gleichungslöser.

3.4.3 Physikalische Darstellung

Programme mit der Möglichkeit zur physikalischen Modellbeschreibung basieren auf der Verbindung von physikalischen Elementen über gerichtete bzw. ungerichtete Leistungsverbindungen (Bondgraphen), welche sich aus dem Produkt von Fluss- und Differenzvariablen ergeben. Die Zustandsgrößen werden dabei durch Fluss- und Differenzgrößenspeicher abgebildet, denen in den verschiedenen physikalischen Domänen bestimmte idealisierte Bauelemente zugeordnet werden können. Innerhalb einer gleichen physikalischen Domäne können Flussgrößenspeicher mit Differenzgrößenspeichern gekoppelt werden. Für die Kopplung gleicher Speichertypen untereinander und die Umwandlung in andere Domänen werden Gyratoren bzw. Transformatoren genutzt. Komplexere Modelle für komplexe Baugruppen können aus mehreren Elementen bestehen und in sogenannten generalisierten Flussgrößen bzw. Differenzgrößenspeichern zusammengefasst werden. Softwareprogramme, die diese Formulierung nutzen sind beispielsweise SimulationX, AMESim, Dymola, die den Standard Modelica unterstützen. In die Gruppe gehören weiterhin Programme wie Saber, Simplorer, die Derivate der Software SPICE oder die Erweiterung SimPowerSystems für MATLAB/Simulink, welche eine schaltplanähnliche Darstellung nutzen ([Kar05], [Ott09]).

Der Vorteil gegenüber den signalflussbasierten Programmen liegt darin, dass in der Regel nur die Topologie der Simulationselemente aufgebaut werden muss, die Aufarbeitung der Gleichungen in eine explizite Form entfällt dabei. Das manuelle und damit fehleranfällige Umstellen der Beziehungen ist nicht nötig und die Elemente sind besser wiederverwertbar. Die in der Regel entstehenden DAE-Systeme sind aufwändiger zu berechnen. Die Realisierung kann über die Auflösung von Zwangsbedingungen durch das Auffinden von Minimalkoordinaten oder durch angepasste DAE-Solver erfolgen [Sch11c].

Ein weiterer Vorteil ist, dass die Programme bereits über vordefinierte Bausteine in einer oder mehreren Domänen verfügen, die eine Implementierung vereinfachen.

3.4.4 Zusammenfassende Bewertung

Alle aufgeführten Arten von Simulationsumgebungen können die auftretenden Gleichungen abbilden. Bei der Software MATLAB stehen mit den Erweiterungen MATLAB/Simulink bzw. MATLAB/Simulink/SimPowerSystems leistungsfähige Werkzeuge zur Verfügung, mit der alle dargestellten Typen der Implementierung abgedeckt werden können.

Mit der Festlegung auf eine rückwirkungsfreie Effect-Cause Modellierung der Systeme ist die Umsetzung in physikalisch motivierten Programmen nicht zweckmäßig, da dies ja gerade dem Ansatz dieser Programme widerspricht. Diese Programme können jedoch für die Anwendung von Stabilitäts- und Schwingungsuntersuchungen von Regelungen im dieselelektrischen System im hohen Frequenzbereich empfohlen werden. So ist beispielsweise die detaillierte Verlustberechnung elektrischer Maschinen im Zusammenspiel mit der Leistungselektronik unter definierten Lastbedingungen möglich. Die Rechnungen und eine sinnvolle Parametrierung sind jedoch sehr aufwändig und zeitintensiv.

Für die Programmierung der Effect-Cause Simulation empfehlen sich demnach MATLAB und MATLAB/Simulink. Mit der QSS-Toolbox der ETH Zürich [RGB99] und dem Programm Advisor der National Renewable Energy Laboratory [MW01] stehen in MATLAB/Simulink leistungsfähige Toolboxen zur Abbildung von hybriden Antriebssträngen in Kfz zur Verfügung. Weiterer Vorteil ist der intuitivere Zugang für den Anwender durch die graphische Darstellung der Blöcke und die Nachvollziehbarkeit der Signalpfade.

Wie in Abschnitt 3.3.3 ausgeführt wurde, sind für Kfz bereits normierte und erfüllbare Fahrzyklen vorgegeben, die Fahrtgestaltung bei Schienenfahrzeugen ist jedoch durch die ganz spezielle Strecke und die Streckenbedingungen determiniert. Deshalb ist für die Einbindung der Fahrdynamik eine Vorwärtsrechnung notwendig. Diese kann zumindest in Advisor durchgeführt werden. Für die Untersuchung der effizienten Fahrtgestaltung ist jedoch eine Kombination aus Vorwärtsrechnung der Beschleunigung und einer Rückwärtsrechnung für die verschiedenen Verzögerungsphasen Ausrollen, rekuperatives Verzögern und Bremsen für die exakte Einhaltung der Geschwindigkeits- und Halterestriktionen notwendig. MATLAB/Simulink ist mit der durchgehenden fortschreitenden Zeitintegration jedoch nur bedingt dafür geeignet. Das Zusammenschneiden der Fahrtrajektorien muss über umgebende Routinen erfolgen. Aus diesem Grund wird die komplette Implementierung in MATLAB durchgeführt, um den Aufwand der Kopplung und den daraus entstehenden Overhead zu vermeiden.

3.5 Aufstellung eines geeigneten Simulationssystems

Auf Basis der in den Abschnitten 3.3 und 3.4 getroffenen Auswahl der Methoden zur Simulation von Fahrdynamik und Kraftstoffverbrauch und der zur Verfügung stehenden Programmwerkzeuge wird im Folgenden die Umsetzung beschrieben (Abbildung 3-8).

Die Simulation kann über eine grafische Eingabeoberfläche (engl. GUI – graphical user interface) oder durch Start eines Ablaufskripts erfolgen. In jedem Fall wird eine Parameterstruktur durch Auslesen der Eingaben aus dem GUI oder durch Auswertung von textbasierten Dateien erzeugt. Nach der Datenaufbereitung wird über die Fahrdynamikgleichungen (Abschnitt 3.1) ein Fahrprofil erstellt. Mit einer Vorwärtsrechnung werden im Folgenden mit Hilfe der quasistatischen Betrachtungsweise (Abschnitt 3.3.3) zuerst die Leistungsanforderungen am Zwischenkreis aus der Leistung der Fahrmotoren und der Hilfsanlagen gebildet. Der Zwischenkreisalgorithmus teilt die Leistung im Folgenden auf die Verbrennungskraftmaschine bzw. die Energiespeicher auf. Die Leistungsbereitstellung resultiert in der Auf- bzw. Entladung der Energiespeicher und in einem Kraftstoffverbrauch.

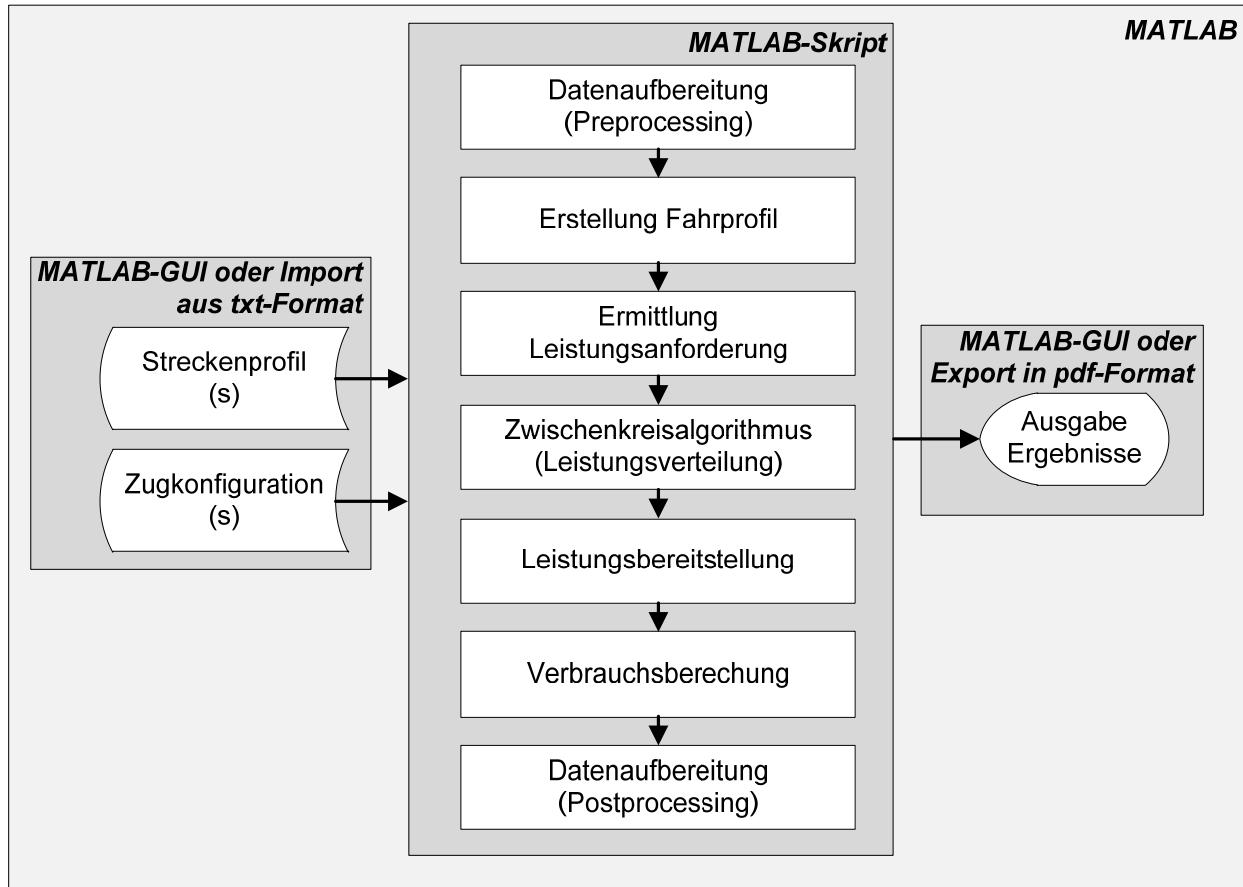


Abbildung 3-8: Darstellung der Simulationsumgebung

Die Modellierung der einzelnen Komponenten wird in den folgenden Unterkapiteln beschrieben. Die erstellten Erweiterungen zur Optimierung der Betriebsweise und der Konfiguration der Lokomotive und der Teilsysteme werden in den entsprechenden Abschnitten zur Optimierung dargestellt. Die Simulationsumgebung wurde unter Zuhilfenahme verschiedener Diplomarbeiten erstellt. Der wesentliche Grundstein wurde in Zusammenarbeit mit ASCHOFF gelegt. In der im Rahmen einer Diplomarbeit erstellten Programmversion wurden bereits wesentliche Funktionen abgebildet [Asc10]. Weiteren Anteil an der Verbesserung des Programms haben ZIMMERMANN mit der Erweiterung zur Nutzung der evolutionären Algorithmen für die Konfigurationsoptimierung [Zim11] und WITTWER mit der Validierung anhand von Messdaten [Wit11].

3.6 Abbildung der Elemente

Vor der detaillierten Beschreibung des Simulationsablaufs soll nun die Modellierung von Komponenten besprochen werden. Die dargestellten Modellierungsansätze bilden die Basis für die nachfolgend erörterten Bilanzgleichungen und sollen die Abbildungstiefe der Simulation nachvollziehbar darlegen.

3.6.1 Dieselmotorgeneratorsatz

Der Dieselmotorgeneratorsatz (Genset) stellt die primäre Energieversorgung der dieselektrischen Lokomotive dar. Durch die Entkopplung der Zustandsgröße Dieselmotordrehzahl von der Fahrgeschwindigkeit der Lokomotive über den Zwischenkreis liegt ein in Grenzen frei stellbares System

vor. Die Möglichkeit der quasistatischen Abbildung des Systems und die Schritte bis zur Entwicklung desselben sollen im Folgenden anhand eines dynamischen Referenzmodells aufgezeigt werden.

Dynamisches Referenzmodell

Die dynamische Modellierung von Dieselmotoren kann in verschiedenen Abbildungstiefen erfolgen. Grundsätzlich kann man die Mittelwertmodelle der Leistungs- und Verbrauchsberechnung von der Verbrennungsprozessrechnung unterscheiden, bei der die Differenzen in der Kraft- und Momentenentfaltung während eines Arbeitstaktes berücksichtigt werden. Letztere werden für die Antriebsdynamik und die Entwicklung der internen Dieselmotorregelung benötigt [SK00]. Hohe Modellierungstiefen wie Mehrzonen- und CFD-Modelle ermöglichen weiterhin die Entwicklung und Verbesserung von Brenn- und Einspritzverfahren [Noc03]. Als Vergleichsmodell soll ein vereinfachtes Mittelwertmodell genutzt werden. Die Zeitkonstante des Verbrennungsmotors ist groß gegenüber elektrischen Verzögerungen im Antriebsstrang [LPRH09], daher werden diese vernachlässigt und die Drehgeschwindigkeit ω bildet die einzige Zustandsgröße im System. Die Drehmomentenbilanz für die Ermittlung der Änderung der Drehgeschwindigkeit wird über das angreifende Moment des Dieselmotors M_{VKM} , des Moments der Hilfsmaschinen M_{HM} , des Reibmoments M_{Reib} der VKM und dem Gegenmoment des Generators M_{GEN} bestehend aus dem äquivalenten Luftspaltmoment und der Generatorreibung gebildet (Abbildung 3-9).

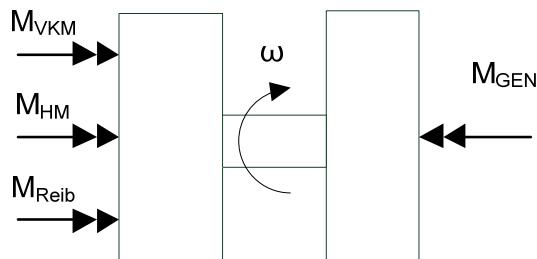


Abbildung 3-9: Momentenbilanz am Genset

Das zur Verfügung stehende Moment des Dieselmotors M_{VKM} beinhaltet während der Einspritzvorgänge bereits das Reibmoment des Verbrennungsmotors, dieses muss nur in Phasen ohne Einspritzung gesondert betrachtet werden. Eine Beschreibung des Berechnungsgangs der angreifenden Momente ist im Anhang in Abbildung B-1 dargestellt.

Die Begrenzung des vom Motor abgegebenen verbrennungsmotorischen Moments erfolgt über die Vollastkennlinie des Verbrennungsmotors (Abbildung 3-10). Die dynamischen Arbeitspunkte der VKM im Drehmomentkennfeld stellen sich je nach der Belastung des Generators ein, welche über die Lastanforderung der Fahrmotoren bzw. der Erregung des Synchrongenerators gesteuert werden kann.

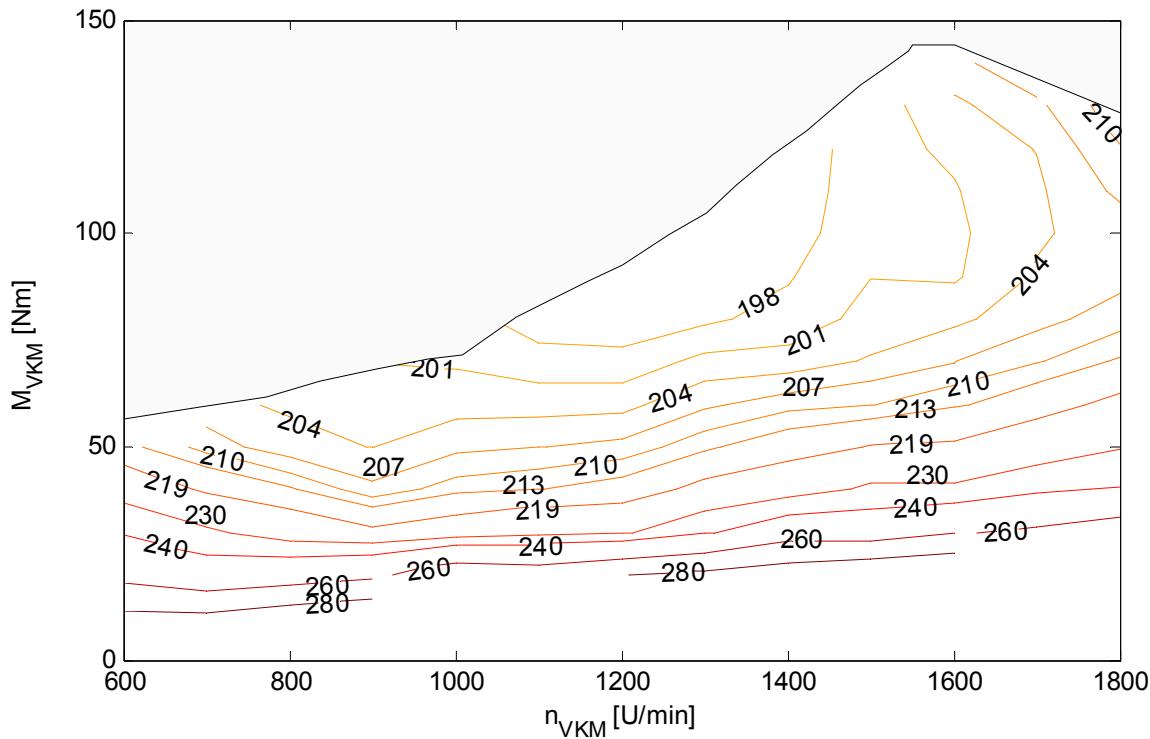


Abbildung 3-10: Drehmomentkennfeld des MTU 4000 R43 Stage 3a mit eingezeichneten Isolinien des spezifischen Kraftstoffverbrauchs in g/kWh (nach [Sch11d])

Die bereits in Abschnitt 2.5 diskutierten Verluste des Dieselmotors können in ihrer Gesamtheit über die Isolinien des spezifischen Kraftstoffverbrauchs b_e ausgewertet werden:

$$b_e = \frac{\dot{m}_{K_r}}{P_{V\text{KM}}} . \quad (3.23)$$

Dieser wird über die Messung des Kraftstoffdurchflusses \dot{m}_{K_r} bei einer definierten VKM-Leistung $P_{V\text{KM}}$ bestimmt und wird in statischen Versuchen ermittelt.

Quasistatische Abbildung

Stellt man das Wirkungsgradkennfeld des Verbrennungsmotors über der Leistung dar (Abbildung 3-11, links), kann der Sollwert der mechanischen Leistungsaufnahme des Generators bei einer bestimmten Drehzahl mit aufgetragen werden. Unter Vernachlässigung des dynamischen Verhaltens des Gensets ergibt sich damit ein absoluter Kraftstoffmassenstrom in Abhängigkeit von der Motorleistung in Willansdarstellung²¹ (Abbildung 3-11, rechts). Gegenüber der Darstellung des relativen Wirkungsgrads bzw. des spezifischen Kraftstoffverbrauchs hat diese Beschreibung den Vorteil, dass der Leerlaufverbrauch des Aggregats abgebildet werden kann.

²¹ Bei der Willansdarstellung wird die absolute Leistungsaufnahme gegenüber der Ausgangsleistung aufgetragen.

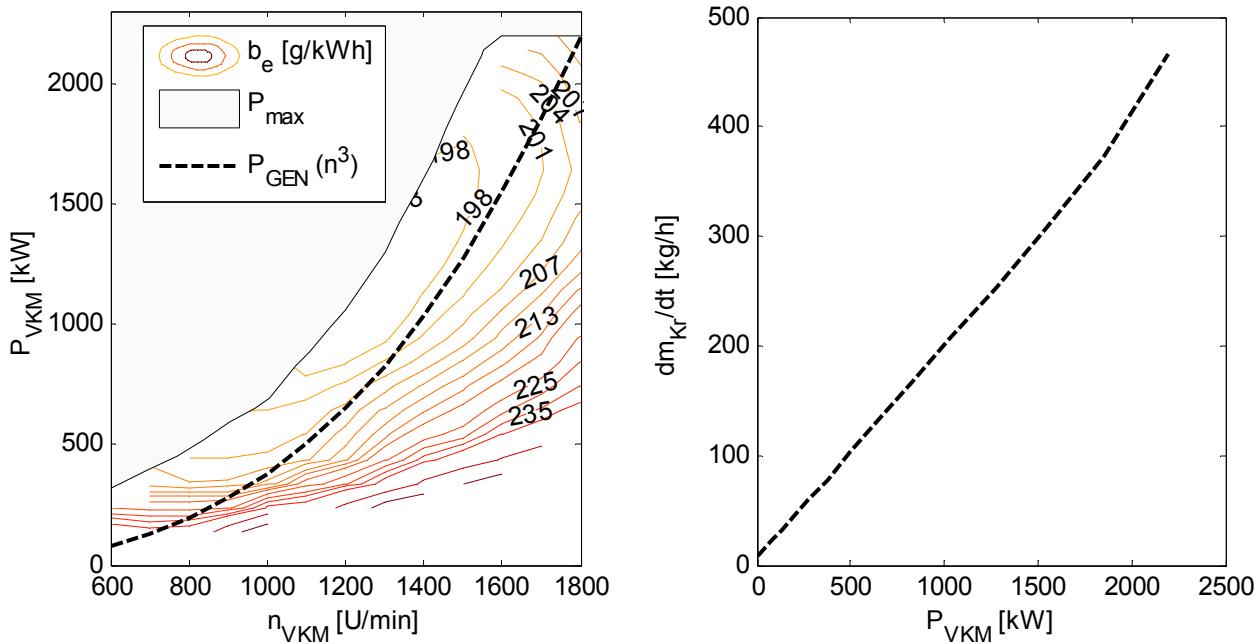


Abbildung 3-11: Spezifisches Verbrauchskennfeld (links), statischer Absolutverbrauch in Abhängigkeit von der Leistung (rechts)

Vergleich von dynamischem und statischem Modell

Für eine Vergleichsrechnung wurde der gemessene elektrischen Leistungsbedarfs einer Messfahrt von Hamburg nach Cuxhaven (HH-CXH) als Eingangsgröße genutzt. Die Nebenaggregateleistung und die Generatorverluste sind in den Modellen auf gleiche Weise abgebildet. Die aus dem Modell entstehende resultierende Leistung des Verbrennungsmotors ist jedoch verschieden, was in Abbildung 3-12 deutlich wird. In dem Leistungsverlauf des dynamischen Modells ist eine Mehrbelastung des Verbrennungsmotors in Phasen steigender Leistungsanforderung sichtbar, während in Phasen fallender Leistungsanforderung ein Teil des notwendigen Moments durch die Massenträgheit des Aggregats aufgebracht wird. Für statische Arbeitspunkte verhalten sich beide Modelle gleich.

Grundlage für dieses Modell ist der Vorgänger des in Abbildung 3-10 gezeigten MTU 4000 R43, welcher in den TRAXX-Lokomotiven der LNPG verbaut ist. Dieser Dieselmotor ist nach UIC II zertifiziert und erreicht im Nennleistungspunkt eine Drehzahl von 1860 U/min [LBJ+10]. Der Vorgang des Hochfahrens des Gensets (Leistungsanstieg) läuft dabei wesentlich langsamer ab als das Herunterfahren.²² Grund dafür sind die Drehzahlanstiegsbegrenzung des Verbrennungsmotors und das Vorhalten einer Leistungsreserve gegen das plötzliche Einschalten von Hilfsanlagen. Das Herabstufen der elektrischen Leistung erfolgt dagegen in wesentlich kürzerer Zeit, jedoch wird die

²² Aus den Daten der Versuchsfahrten HH-CXH wurde ein durchschnittlicher Leistungsanstieg von 125 kW/s ermittelt.

Verzögerung der Gensetdrehzahl durch Manipulation des Motorlastsignals verlangsamt.²³ Dieses Verhalten wurde in der vorliegenden Simulation nicht nachgebildet.

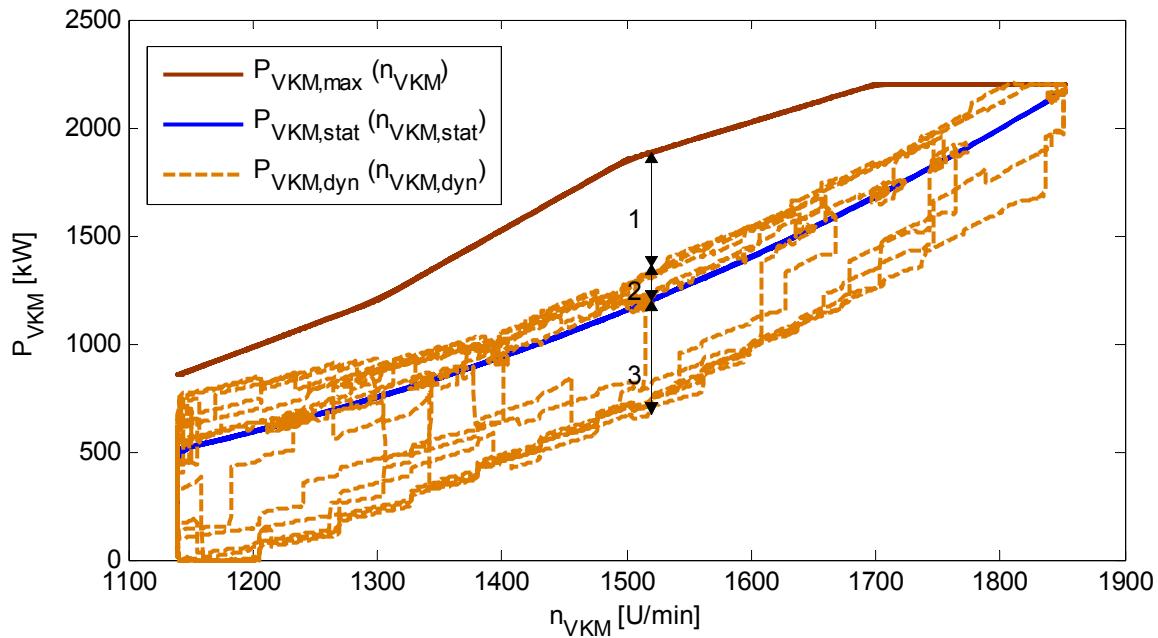


Abbildung 3-12: Arbeitspunkte des Motors im Vergleich der statischen gegenüber der dynamischen Betrachtungsweise (1..Leistungsreserve, 2..Mehrleistung bei Beschleunigung, 3..Minderleistung bei Verzögerung)

Die Differenz in der Verbrauchsberechnung auf Basis des Verbrauchskennfelds beträgt nur 0,01 Prozent und ergibt sich aus den in einigen Phasen leicht verschiedenen Lastpunkten. Die Abweichung ist nicht größer, weil wie in Abbildung 3-12 gezeigt wurde, die Differenz der kinetischen Energie der Drehträgheit des Gensets²⁴

$$E_{\text{kin,Genset}} = \frac{1}{2} \cdot (J_{\text{Genset}}) \cdot (\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (3.24)$$

in den Verzögerungsphasen des Gensets wieder genutzt wird. Aus den geringen Differenzen kann geschlussfolgert werden, dass die Vernachlässigung des dynamischen Hochlaufvorgangs aus energetischer Sicht möglich ist. Nichtdestotrotz ist der Einfluss des Leistungsanstiegs beim Motorhochlauf bei fahrdynamischen Berechnungen zu berücksichtigen (siehe Abschnitt 3.8.3). In Abbildung 3-12 wird ersichtlich, dass die applizierte Leistungsanstiegsbegrenzung die Leistungsfähigkeit des Motors bei weitem nicht ausreicht:

$$P_{\text{KW}}(P_{\text{ZK,DC}}) + P_{\alpha}(dP_{\text{KW,soll}} / dt) < P_{\text{VKM,max}}(n). \quad (3.25)$$

Ursache dafür ist die Sicherheitsreserve gegen plötzliche Lastschwankungen, wie sie beispielsweise beim Schalten von Nebenverbrauchern auftreten kann. Eine weitere Restriktion stellt die

²³ Der Leistungsgradient beträgt im Mittel ca. 400 kW/s (Abbildung C-2).

²⁴ Die Energiedifferenz zwischen Höchstdrehzahl $\omega_2 = 1860 \text{ U/min}$ und Leerlaufdrehzahl $\omega_1 = 600 \text{ U/min}$ bei einer Trägheit des Gensets $J_{\text{Genset}} = 100 \text{ kgm}^2$ beträgt 0,472 kWh.

Drehzahlanstiegsbegrenzung dar. Der zulässige Drehzahlgradient ist für Gensets mit schnelllaufenden Dieselmotoren²⁵ in Bahnfahrzeugen wesentlich kleiner als für Dieselmotoren in Kraftfahrzeugen.²⁶ Dies schränkt die Dynamik des Gensets und in Folge auch des Gesamtfahrzeugs ein.

Verluste am fremderregten Synchrongenerator

Die Verluste im Drehstromsynchrongenerator setzen sich aus Statorverlusten, Eisenverlusten, Erregerverlusten, Lüfterverlusten und Zusatzverlusten zusammen. Die Statorverluste $P_{\text{GEN},\text{Stator}}$ repräsentieren die ohmschen Verluste in den Statorwicklungen und sind abhängig vom Statorwiderstand des Generators $R_{\text{GEN},\text{Stator}}$ und dem Effektivstrom $I_{\text{GEN,eff}}$:

$$P_{\text{GEN},\text{Stator}} = 3 \cdot R_{\text{GEN},\text{Stator}} \cdot I_{\text{GEN,eff}}^2. \quad (3.26)$$

Die Eisenverluste ergeben sich aus den Hysterese- ($P_{\text{GEN},\text{Hysterese}}$) und Wirbelstromverlusten ($P_{\text{GEN},\text{Wirbel}}$) [Mey32]. Werden keine FEM-Berechnungen zum Fluss in der Maschine durchgeführt, können die Verluste in bestimmten Arbeitspunkten durch empirische Näherungsgleichungen bestimmt werden. Die Eisenverluste können über

$$P_{\text{GEN,Fe}} = P_{\text{GEN},\text{Hysterese}} + P_{\text{GEN},\text{Wirbel}} = k_{\text{Hysterese}} \cdot f \cdot B^2 + k_{\text{Wirbel}} \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (3.27)$$

in Abhängigkeit von der Magnetisierungsfrequenz f und der magnetischen Flussdichte B bestimmt werden. Die Verluste im Erreger $P_{\text{GEN,Err}}$ sind ergeben sich aus dem Erregerwiderstand $R_{\text{GEN,Err}}$ und dem Erregerstrom $I_{\text{GEN,Err}}$:

$$P_{\text{GEN,Err}} = R_{\text{GEN,Err}} \cdot I_{\text{GEN,Err}}^2. \quad (3.28)$$

Die Reibungsverluste unterteilen sich in die drehzahlabhängigen Lüfterverluste $P_{\text{GEN,Lüfter}}$ und Lagerverluste $P_{\text{GEN,Lager}}$. Die Verlustkoeffizienten k sind anwendungsabhängig zu bestimmen:

$$P_{\text{GEN,Reib}} = P_{\text{GEN,Lüfter}} + P_{\text{GEN,Lager}} = k_{\text{Lüfter}} \cdot \left(\frac{n_{\text{ist}}}{n_{\text{max}}} \right)^3 + k_{\text{Lager}} \cdot \left(\frac{n_{\text{ist}}}{n_{\text{max}}} \right). \quad (3.29)$$

Die Gesamtverluste des Generators $P_{\text{GEN,V}}$ in einem Betriebspunkt setzen sich aus den Verlustanteilen

$$P_{\text{GEN,V}} = P_{\text{GEN},\text{Stator}} + P_{\text{GEN},\text{Fe}} + P_{\text{GEN},\text{Err}} + P_{\text{GEN},\text{Reib}} + P_{\text{GEN},\text{Zusatz}} \quad (3.30)$$

zusammen. Die Bestimmung der Kennwerte ist in der Praxis schwierig, da die Verlustkoeffizienten für die Eisenverluste, die Reibungsverluste und die Zusatzverluste aus Datenblattangaben nicht zu ermitteln sind. Für die Berechnung wurde deshalb ein vom Hersteller bereitgestelltes Verlustkennfeld verwendet (Abbildung B-2).

²⁵ Der Begriff schnelllaufend charakterisiert im Bahnbereich Motoren, die eine Nenndrehzahl von größer als 1000 U/min aufweisen [HT05].

²⁶ Die Drehzahlanstiegsbegrenzung ist stark dieselmotorabhängig. Bei den Motoren der ALP-45 DP beträgt diese z. B. 100 (U/min)/s [Vit09].

3.6.2 Zwischenkreis und Leistungselektronik

Grundlagen

Der Zwischenkreis und die angeschlossenen leistungselektronischen Bauelemente haben die Funktion einer Leistungsschnittstelle im Fahrzeug. Nach dem Leistungsflussdiagramm in Abbildung 3-20 sind an den Zwischenkreis Leistungsquellen und Senken angeschlossen. Zu diesen gehören der über den B6-Gleichrichter angeschlossene Drehstromsynchrongenerator, die über den Hilfsbetriebumrichter (HBU) versorgten Hilfsanlagen, die über den Zugsammelschienenumrichter angeschlossene Zugsammelschiene zur Versorgung der Wagen und die über Pulswechselrichter angesteuerten Fahrmotoren. Die gekoppelten Elemente arbeiten nach den entsprechenden Komponenten und Anforderungen mit einer speziellen (ggf. variablen) Frequenz, einer bestimmten Anzahl von Phasen und einem bestimmten Spannungsniveau. Diese Spezifika müssen durch leistungselektronische Baugruppen sichergestellt werden. In der Regel sind diese unidirektional ausgeführt. Ausnahmen bilden die bidirektonalen Pulswechselrichter der Fahrmotoren und die in Abschnitt 2.6.7 aufgeführten Elemente zur Ankopplung von Energiespeichern. Als elektronische Bauelemente kommen in den leistungselektronischen Stellgliedern Dioden und schaltbare Bauelemente (Thyristor, GTO, heute vorwiegend IGBTs) zum Einsatz. Die Topologien und Steuerverfahren der leistungselektronischen Geräte für einen Einsatzzweck können stark variieren, so sind z. B. für Pulswechselrichter verschiedenste Topologien (2-Punkt-, 3-Punktwechselrichter etc.) im Einsatz. Die Elemente sind in der Regel verlustbehaftet, was in der Modellierung berücksichtigt werden muss. Möglichkeiten zur Modellierung der Elemente sind im Folgenden aufgeführt.

Zwischenkreiskapazität

Die Zwischenkreiskapazität hat die Aufgabe, die Gleichspannung zu glätten. Die Zustandsgröße Spannung U_{ZK} verändert sich proportional zur Integration der Zwischenkreisströme I_{ZK} . Die Integrationskonstante ist das Reziproke der Zwischenkreiskapazität C_{ZK} :

$$U_{ZK,1} = \frac{1}{C_{ZK}} \cdot \int_{t_0}^{t_1} I_{ZK} dt + U_{ZK,0}. \quad (3.31)$$

Die resultierende Übertragungsfunktion zeigt mit steigender Frequenz einen Abfall von -20 dB/Dekade. Damit können wechselnde Strombelastungen im höheren Frequenzbereich wirkungsvoll gefiltert werden. Die Speicherwirkung ist jedoch gering und für die energetische Betrachtung zu vernachlässigen²⁷:

$$E_C = 0,5 \cdot C_{ZK} \cdot (U_1^2 - U_0^2). \quad (3.32)$$

Wird die Zwischenkreisspannung bei der energetischen Betrachtung für die Berechnung der Wirkungsgrade von angrenzenden Komponenten oder für die Auslegung von Bauteilen benötigt, kann der Wert quasistatisch aus Generatordrehzahl, Erregung und Last bestimmt werden, wie bei der

²⁷ Der Energieinhalt beträgt im Beispiel 28,7 kW·s bei Annahme einer Zwischenkreiskapazität von $C_{ZK}=18\text{ mF}$ und Vorgabe der Spannungsgrenzen mit $U_1=1900\text{ V}$ und $U_0=650\text{ V}$.

dynamischen Betrachtung unter Berücksichtigung der Generatordrehzahl geschehen (Abbildung B-1). Für die dynamische Betrachtung von Systemen mit mehreren Gensets, welche auf einen Zwi-schenkreis speisen, muss die Zwischenkreiskapazität jedoch abgebildet werden, weil sie für die Lastaufteilung der Generatoren untereinander von Bedeutung ist (siehe Abschnitt 5.6).

Verluste in elektronischen Bauelementen

Die Verluste in elektronischen Bauelementen können prinzipiell in Durchlassverluste und Schalt-verluste unterteilt werden. Die Durchlassverluste entstehen durch den Spannungsabfall über dem Bauelement und sind stromabhängig [Ber08]:

$$P_{\text{LE,Durchlass}} = f(i_{\text{LE}}). \quad (3.33)$$

Schaltverluste treten während der Ein- und Ausschaltvorgänge auf. Sie sind geprägt durch den langsamem Abfall und Aufbau der Sperrspannung bei gleichzeitig verzögertem Strom. Während des Schaltvorgangs sind die Verluste

$$P_{\text{LE,Schalt}} = \frac{\int_{t_a}^{t_e} u_{\text{LE}} \cdot i_{\text{LE}} dt}{(t_e - t_a)} > P_{\text{LE,Durchlass}} \quad (3.34)$$

größer als bei vergleichbarem Stromfluss in einer Durchlassphase. Die Durchlassverluste sind damit abhängig von der Charakteristik des Bauelementes $k_{\text{Durchlass}}$, dem Strom i_{LE} , dem Spannungsniveau u_{LE} und der Häufigkeit der Schaltvorgänge, repräsentiert durch die Schaltfrequenz f_{Schalt} :

$$P_{\text{LE,Durchlass}} = f(k_{\text{Durchlass}}, i_{\text{LE}}, u_{\text{LE}}, f_{\text{Schalt}}). \quad (3.35)$$

Die Verluste an einem Bauelement summieren sich zu den Gesamtverlusten:

$$P_{\text{LE,V}} = P_{\text{LE,Schalt}} + P_{\text{LE,Durchlass}}. \quad (3.36)$$

Verluste von leistungselektronischen Geräten

Die Verluste der in einer Schaltung integrierten Bauelemente können wiederum zu einer Gesamt-verlustleistung addiert werden. Die Berechnung muss unter Beachtung der Steuerverfahren und der Topologie erfolgen und wird zweckmäßigerweise in Schaltungssimulationsprogrammen durchge-führt. Bei der Berechnung der Verluste ist außerdem die Auswirkung des Phasenwinkels und der Oberwellen auf den Generator- bzw. Fahrmotorwirkungsgrad zu beachten, welche einen maßgebli-chen Einfluss haben [MH08].

Abbildung in der Simulation

Bei der quasistatischen Simulation erfolgt die Abbildung über applizierbare statische Wirkungsgra-de. Für den Gleichrichter wurde aus internen Auslegungsdokumenten ein mittlerer Wirkungsgrad von 99,3 Prozent bestimmt, der mit Datenblättern aus der Literatur plausibilisiert wurde. Der mitt-lere Wirkungsgrad der Fahrmotorumrichter ist mit 98,8 Prozent appliziert. Dafür wurden von der Fa. BT bereitgestellte Daten [Sch09] verschiedener Betriebspunkte gemittelt. Die arbeitspunkttab-

hängige Verlustbeschreibung für den Fahrmotorumrichter bzw. den Gleichrichter ist jedoch bei Einarbeitung der Verluste in die Wirkungsgradkennfelder von Fahrmotor bzw. Generator möglich. Verluste im Leerlauf werden in der Grundeinstellung vernachlässigt, können bei Bedarf aber in der Abbildung der Hilfsanlagenleistung Berücksichtigung finden.

3.6.3 Fahrmotoren und Getriebe

Bei der heutigen Drehstromantriebstechnik kommen überwiegend Asynchronmaschinen als Fahrmotoren zum Einsatz. Die Verluste können in statorseitige und rotorseitige Verlustleistung aufgeteilt werden. Die statorseitige Verlustleistung umfasst die Kupferverluste durch den Widerstand der Statorspulen und die Eisenverluste. Mit Zusatzverlusten können parasitäre Streuverluste im Magnetfeld abgedeckt werden. Die rotorseitige Verlustleistung ergibt sich aus den Reibungsverlusten des Rotors und den rotorseitigen ohmschen Verlusten durch den Stromfluss. Die prinzipielle Wirkung und Abhängigkeit der Verlustquellen wurde in Abschnitt 3.6.1 für den Generator bereits beschrieben. Deshalb soll hier darauf verzichtet werden. Stattdessen wird auf die Abbildung über quasistatische Kennfelder verwiesen, wie sie für energetische Betrachtungen üblich und in der Literatur [LE03] beschrieben ist.

Bei der Lokomotive TRAXX stehen moderne Drehstromasynchronmaschinen als Fahrmotor zur Verfügung, welche im Nennpunkt einen Wirkungsgrad von bis zu 96 Prozent erreichen (Abbildung 3-13). Das Kennfeld wurde im Rahmen einer Studienarbeit über analytische Berechnungen aus den Datenpunkten der Volllastkurve abgeleitet [Ste10a]. Der Motor arbeitet im Vierquadrantenbetrieb (zwei Drehrichtungen, jeweils Motor- und Generatorbetrieb). Im Kennfeld sind zwei Quadranten (Motor- und Generatorbetrieb) aufgetragen. Bei entgegengesetzter Drehrichtung tritt ein äquivalentes Verhalten auf.

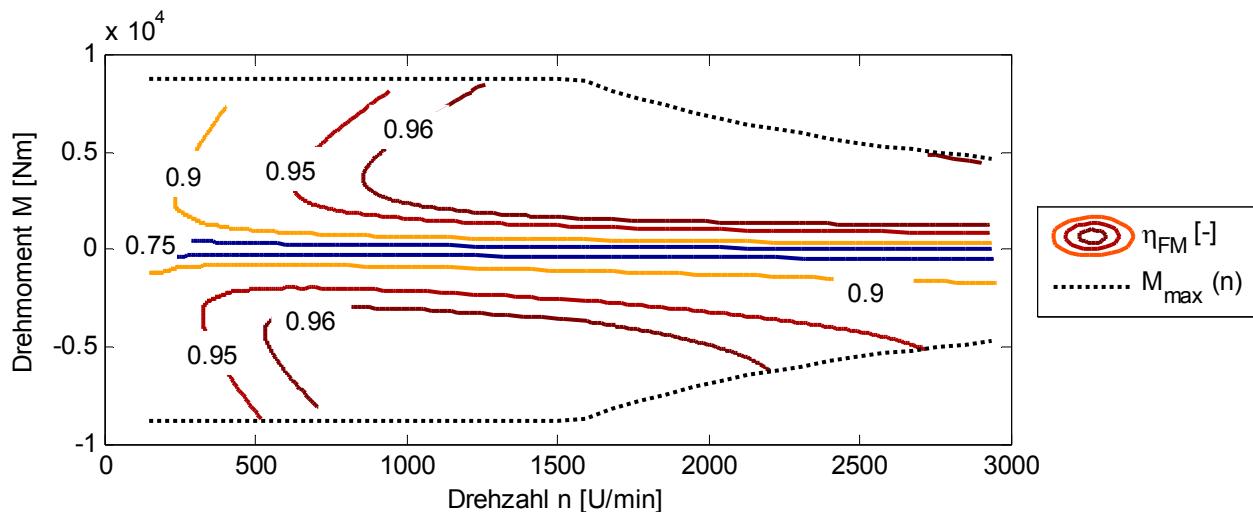


Abbildung 3-13: Wirkungsgradkennfeld Fahrmotor [Ste10a], S. 43)

Die Kopplung zwischen Fahrmotoren und Rädern erfolgt über ein Getriebe mit einer Übersetzung i_{GET} von 5,227. Mit dem Treibraddurchmesser d_{Rad} von 1250 mm [BT05] kann der Zusammenhang zwischen Fahrmotordrehzahl n_{FM} und der Fahrgeschwindigkeit v bestimmt werden:

$$n_{\text{FM}} = \frac{\nu \cdot i_{\text{GET}}}{\pi \cdot d_{\text{Rad}}}. \quad (3.37)$$

3.6.4 Nebenaggregate

Die Modellierung der in Abschnitt 2.3.5 vorgestellten Nebenaggregate erfolgt getrennt. Dabei werden die mechanisch mit der Kurbelwelle verbundenen Hilfsmaschinen und die über den Hilfsbetriebumrichter aus dem Zwischenkreis versorgten Hilfsanlagen unterschieden.

Hilfsmaschinen

Allgemein stellen die Hilfsmaschinen häufig Aggregate dar, die für den Betrieb des Motors notwendig sind. Die Ankopplung der Hydraulikpumpen für den Antrieb des Kühlerlüfters des Hauptkühlturms hat den Vorteil, dass bei hoher Motorlast bedingt durch die applizierte Leistungskurve des Motors gleichzeitig eine hohe Drehzahl herrscht, was eine hohe Pumpleistung begünstigt. Für den Bedarf der Hilfsmaschinen ist deshalb bei quasistatischer Betrachtungsweise die Möglichkeit der Abbildung der Verlustleistung in Abhängigkeit von der Verbrennungsmotorleistung günstig:

$$P_{\text{HM}} = f(P_{\text{VKM}}). \quad (3.38)$$

Die Leistungsaufnahme der Pumpen ist stark von der Auslegung des Kühlsystems abhängig und muss vom Hersteller in Form von Rechenergebnissen oder Messwerten zur Verfügung gestellt werden.

Hilfsanlagen

Die Hilfsanlagen betreffen in der Regel Bereiche, welche nicht vom Lastpunkt, sondern vom Fahrbetrieb und der Steuerung abhängig sind. Eine genauere Betrachtung der Hilfsanlagen macht eine Modellierung der Hilfsanlagensteuerung und den dafür benötigten Zustandsgrößen notwendig. Für energetische Betrachtungen ist die Berücksichtigung der mittleren Bedarfe in verschiedenen Fahrphasen ausreichend. Die Fahrphasen werden dabei in Beschleunigungs-, Konstantfahr-, Ausroll-, Rekuperations-, Brems- und Haltephasen unterteilt [Wit11]:

$$P_{\text{HA}}(z_{\text{Fahr}}) = P_{\text{HA,LOK}}(z_{\text{Fahr}}) + P_{\text{HA,ZEV}}(z_{\text{Fahr}}). \quad (3.39)$$

Die fahrzustandsabhängige Abbildung wird notwendig, weil sowohl die Leistungsaufnahme bei den über den Hilfsbetriebumrichter gespeisten Hilfsanlagen $P_{\text{HA,LOK}}$ als auch bei der Zugenergieversorgung $P_{\text{HA,ZEV}}$ unter Umständen nicht gleichverteilt auftritt und in Grenzen zeitlich verschiebbar ist (siehe Abschnitt 2.5.2 Senkung des Nebenaggregatebedarfs).

3.6.5 Bremsen

Ein Wagenzug mit dieselelektrischer Lokomotive weist zwei grundsätzliche Bremseinrichtungen auf. Die klassische Variante ist das vorgeschriebene mechanische Druckluftbremssystem, welches auf eine Klotz- bzw. Scheibenbremse wirkt. Es wird unterstützt durch die elektrische Bremse, welche über den generatorischen Betrieb der Fahrmotoren funktioniert. Die erzeugte elektrische Leistung kann über die Verbraucher am Zwischenkreis, den Bremswiderstand bzw. durch elektrische

Energiespeicher aufgenommen werden. Die Aufteilung der Bremsleistung hat somit auch Rückwirkungen auf den Leistungsfluss der dieselelektrischen Lokomotive und muss abgebildet werden.

Bremsblending

Die elektrische Bremse hat gegenüber der Druckluftbremse den Vorteil, dass während der Bremseung außer dem Radverschleiß nur ein zu vernachlässigender Alterungseffekt an elektrischen Bauelementen auftritt. Weiterhin kann ein Teil der Bremsleistung für die Versorgung der Hilfsanlagen genutzt werden, was eine Verbrauchseinsparung mit sich bringt. Deshalb wird im Betrieb die elektrische Bremse bevorzugt benutzt. Damit kann der Anteil der elektrischen Bremskraft $F_{B,\text{el}}$ an der gesamten Bremskraft F_B über

$$F_{B,\text{el}} = \min(F_B, F_{B,\text{el,zul}}) \quad (3.40)$$

bestimmt werden. Somit gilt für die von der Druckluftbremse aufgebrachte Bremskraft $F_{B,\text{mech}}$:

$$F_{B,\text{mech}} = F_B - F_{B,\text{el}}. \quad (3.41)$$

Elektrische Bremse

Die maximal zur Verfügung stehende elektrische Bremskraft wird limitiert durch die maximale regenerative Leistung des Fahrmotorumrichters²⁸ $P_{\text{FM,reg}}$. Weiterhin darf die maximal zulässige dynamische Bremskraft $F_{B,\text{dyn,max}}$ der Lokomotive²⁹ nicht überschritten werden, was insbesondere im unteren Geschwindigkeitsbereich eine Restriktion bedeutet. Es gilt:

$$F_{B,\text{el,zul}} = \max[F_{B,\text{dyn,max}}, F(P_{\text{FM,reg}}, v)]. \quad (3.42)$$

In Abbildung 3-14 ist das Bremsblending für die beschriebene Bremskonfiguration dargestellt. Man erkennt den geringeren Anteil der elektrischen Bremse an der Bremskraft im höheren Geschwindigkeitsbereich.

²⁸ Die maximale regenerative Leistung des Fahrmotorumrichters ist durch den Fahrmotor, durch die Leistungselektronik oder die maximale Aufnahmefähigkeit der Leistungssenken (insbesondere des Bremswiderstands) am Zwischenkreis bestimmt.

²⁹ Die Definition der zulässigen dynamischen Bremskraft der Lok ist länderspezifisch [Vit11]. Der Wert ist in der Regel niedriger als die mögliche Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt, da eine Entgleisung von Wagen aufgrund der hohen Pufferkräfte verhindert werden soll.

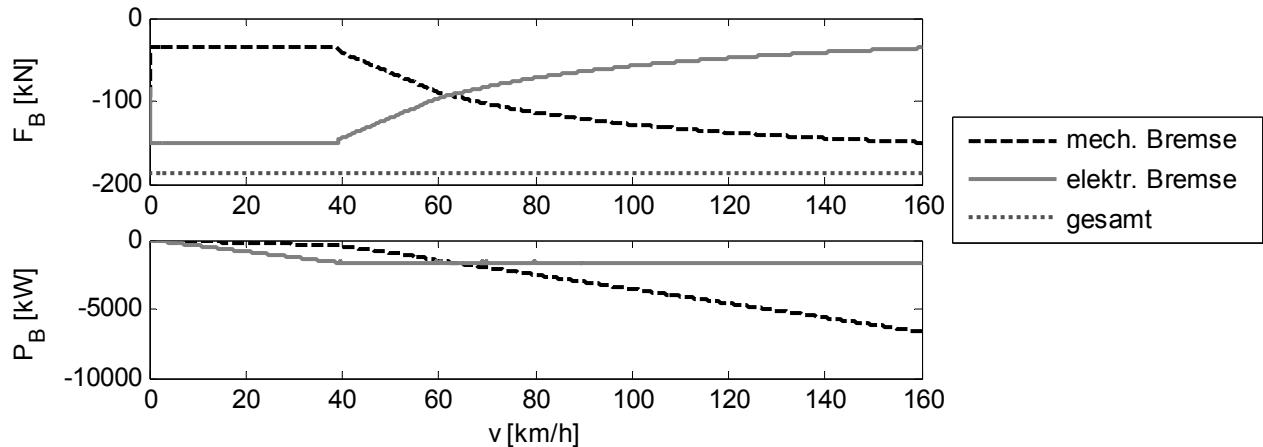


Abbildung 3-14: Verlauf von Bremskraft- und Bremsleistung für eine Bremsung aus 160 km/h unter Vernachlässigung der Fahrwiderstände³⁰

3.7 Elektrische Energiespeicher

In die Modellierung wurden die Li-Ionen-Batterien und Doppelschichtkondensatoren einbezogen, welche sich in der Vorevaluation in Abschnitt 2.6.6 als besonders geeignet für die Speicherung der elektrischen Energie in der Anwendung einer dieselelektrischen Lokomotive herausgestellt haben. Im Folgenden soll die Modellierung der Speicher für die gewählte Simulationstiefe erläutert werden. Dabei sind insbesondere die Bereiche Spannungsverhalten, zulässige Speicherströme beim Laden und Entladen, die Verlustabbildung, die Alterung und das thermische Verhalten zu betrachten.

Ziel der Modellierung ist dabei nicht die möglichst genaue Abbildung der Energiespeicher als elektrochemisches System, sondern die Konzentration auf folgende für das Gesamtsystem relevante Parameter:

- zuverlässige Bestimmung des Ladezustands,
- Festlegung der Grenzen der Strombelastung für die korrekte Abbildung eines realisierbaren Energiemanagements,
- Bestimmung der Speicherverluste für eine gute energetische Bilanzierung und
- die Gewinnung von Kenngrößen zur Bestimmung der Lebensdauer.

Die Modellierung erfolgt vor dem Hintergrund der Anwendung in einem Hybridsystem, bei welchem im Normbetrieb aus Alterungsgründen für Batteriespeicher nur ein geringer Ladehub (DOD) zugelassen wird. Weiterhin ist davon auszugehen, dass das System innerhalb des zulässigen Temperaturbereichs betrieben wird. Der Grund sind die langen Betriebsphasen der Batterie in der Lokomotivenanwendung. Dies macht einen effizienten Betrieb des Temperierungssystems möglich und Phasen von Über- und Untertemperatur treten nur beim Aufrüsten der Lokomotive auf. Au-

³⁰ Randbedingungen: 1600 kW regenerative Bremsleistung, maximale dynamische Bremskraft 150 kN [BT05], Bremsbeschleunigung -0,5 m/s²)

Bei dem ist es möglich, die Batterieleistung in dieser Betriebsphase zu drosseln, da das Fahrzeug nicht auf das Boosten³¹ durch die Batterie angewiesen ist. Diese Eigenschaften unterscheiden den Betrieb wesentlich von der Anwendung in rein elektrischen Kraftfahrzeugen, in welchen der Energiespeicher oft auf Kurzstrecken betrieben wird und die alleinige Energiequelle darstellt [JZS+10].

3.7.1 Ladezustandsbestimmung

Beim Begriff des Ladezustands sind zwei Kenngrößen zu unterscheiden, der energetische und der coulombsche Ladezustand. Der coulombsche Ladezustand SOC_Q wird über

$$SOC_Q = \frac{Q}{Q_{\text{nom}}} \quad (3.43)$$

durch die zugeführte Ladungsmenge Q bestimmt. Bei Batterien wird aufgrund der schwankenden entnehmbaren Ladungsmenge³² ein reziproker Ladezustand q oft über die entnommene Ladungsmenge Q_{entn} und dem Nennladungsinhalt Q_{nom} definiert:

$$q = 1 - \frac{Q_{\text{entn}}}{Q_{\text{nom}}}. \quad (3.44)$$

Die Verluste durch die Selbstentladung sind für Hybridanwendungen sowohl bei Doppelschichtkondensatoren als auch bei Batterien zu vernachlässigen.³³ Die gespeicherte Ladungsmenge wird somit über:

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} Idt + Q_0 \quad (3.45)$$

aus dem Integral des Klemmenstroms I bestimmt (engl. coulomb counting). Für energetische Be- trachtungen wird in der Regel der energetische Ladezustand SOC verwendet. Der SOC ergibt sich aus dem Quotienten aus entnehmbarer Energie E und dem Nennenergieinhalt E_{nom} :

$$SOC = \frac{E}{E_{\text{nom}}}. \quad (3.46)$$

3.7.2 Spannungsverhalten und Ersatzschaltbild

Das Spannungsverhalten von Speichern ist im Allgemeinen vom Ladezustand q , der Strombelastung I , der Zelltemperatur T_{Zelle} und dem Alterungszustand SOH abhängig:

$$U = f(q, I, T_{\text{Zelle}}, \text{SOH}). \quad (3.47)$$

³¹ Der Begriff Boosten ist durch die (zeitlich begrenzte) Steigerung der Leistungsfähigkeit einer Anlage durch ein zusätzliches Speichersystem gekennzeichnet.

³² Die tatsächlich entnehmbare Ladungsmenge ist abhängig von der Temperatur, dem Entladestrom und der Vorgeschichte der Speichernutzung [JW06].

³³ Die Selbstentladung eines Doppelschichtkondensators auf 50 Prozent der Ladung dauert 30 Tage [Max08a]. Für Li-Ionen-Batterien wird ein ladungsbezogener Wirkungsgrad (auch Ah Wirkungsgrad) von 99,9 Prozent angegeben ([JW06], S. 29).

Aufgrund der chemischen Eigenschaften lässt sich bei Li-Ionen-Batterien zusätzlich eine Abhängigkeit vom vorhergehenden Belastungsverlauf nachweisen [RS11].

Batterien

Die Abbildung des Spannungsverhaltens von Batterien an den Klemmen kann durch eine Spannungsquelle in Reihe mit einer Reaktanz erfolgen. Unter Vernachlässigung des Frequenzverhaltens ergibt sich ein einfaches Ersatzschaltbild, wie es für die energetische Betrachtung in verschiedenen Anwendungen erfolgreich genutzt wird ([GS07], S. 97). Der Widerstand wird bei Benutzung des Dauerstromwiderstandes durch Vernachlässigung parasitärer Kapazitäten leicht überschätzt. Dies wird durch die in den Datenblattangaben nicht enthaltene Widerstandserhöhung bei Alterung kompensiert.

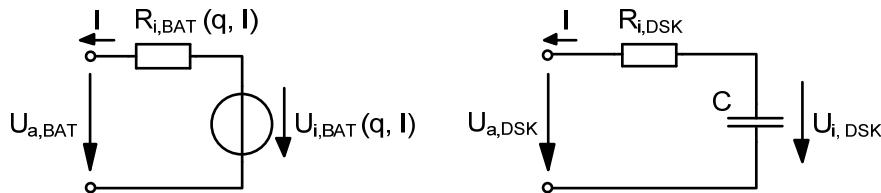


Abbildung 3-15: Ersatzschaltbilder (links: Batterie, rechts: Doppelschichtkondensator)

Das Ersatzschaltbild ermöglicht die Parametrierung mit Datenblattangaben, ohne dass dafür Batteriezellen beschafft und aufwändige Messungen durchgeführt werden müssen. In der Regel sind jedoch nur Kurven für typische Entladezyklen verfügbar. Li-Ionen-Batterien zeigen jedoch bezüglich des Innenwiderstands ein ähnliches Verhalten für Laden und Entladen [Jos09]. Ein Beispiel für typische Entladekurven zeigt die aus dem Datenblatt einer kommerziellen Li-Ionen-Batterie [Saf05c] gewonnene Abbildung 3-16. In dieser Abbildung wird gleichzeitig die Approximation des Innenwiderstands $R_{i,BAT}$ und der Klemmenspannung $U_{i,BAT}$ mit linearen Ansätzen für den Innenwiderstand und die Spannung gezeigt:

$$U_{i,BAT} = k_3 \cdot q + k_1 \text{ und } R_{i,BAT} = k_4 \cdot q + k_2. \quad (3.48)$$

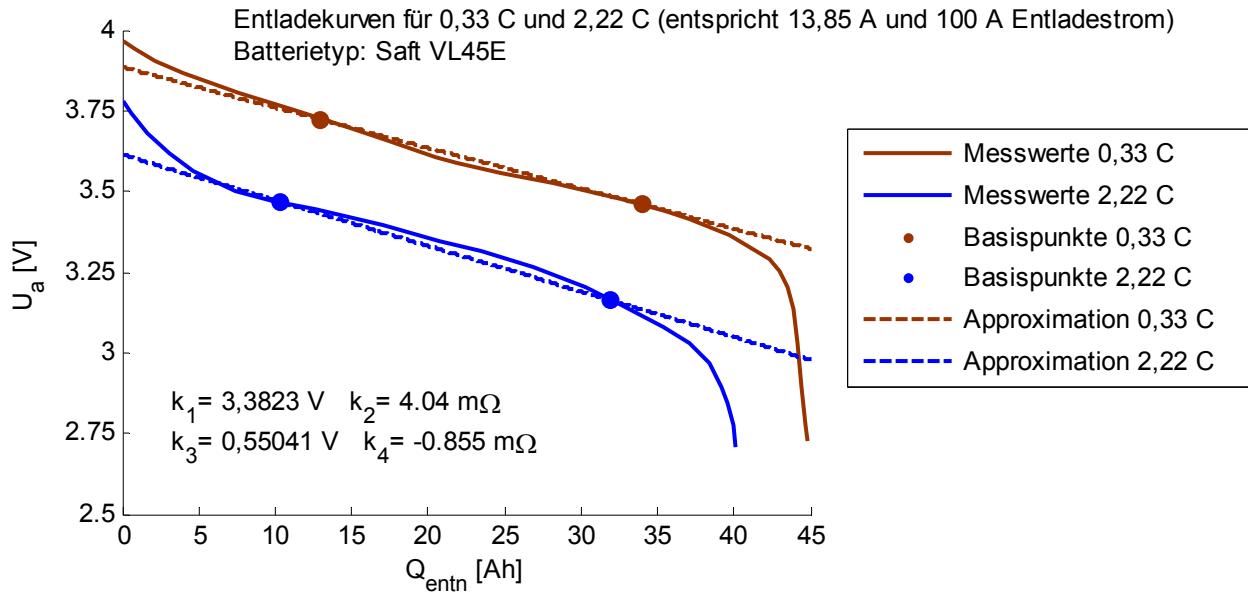


Abbildung 3-16: Approximation von gemessenen Entladekurven (nach Messdaten [Saf05c])

Die äußere Klemmenspannung ergibt sich zu:

$$U_{a,BAT} = U_{i,BAT} - I \cdot R_{i,BAT}. \quad (3.49)$$

Die Abweichung der Ergebnisse des linearen Approximationsansatzes von den gemessenen Verläufen sind in Abbildung 3-16 dargestellt. Weiterhin sind die für die Approximation genutzten Basispunkte angegeben. Der gewählte Ansatz deckt den Einsatzbereich von Hybridbatterien gut ab. Es fällt auf, dass die ladungsabhängigen Koeffizienten k_2 und k_4 geringe Werte haben. Der relative Spannungsabfall bezogen auf 20 Prozent DOD beträgt nur 3,3 Prozent und die relative Widerstandsänderung 4,2 Prozent. Die Auswirkungen auf die energetische Simulation sind damit bei der Verwendung der mittleren Spannung und eines mittleren Widerstands so gering, dass Sie im Sinne einer vereinfachten Parametrierung vernachlässigt werden können. Die Batterie kann folglich für diese Simulationstiefe mit ladezustandsunabhängigen konstanten Werten für $U_{i,BAT}$ und $R_{i,BAT}$ betrachtet werden.

Unter diesen Annahmen wird der energetische Ladezustand der Batterie SOC_{BAT} über:

$$SOC_{BAT} = \frac{Q}{Q_{nom}} \quad (3.50)$$

bestimmt.

Doppelschichtkondensatoren

Doppelschichtkondensatoren zeigen aufgrund der elektrostatischen Energiespeicherung ein Spannungsverhalten, welches über den idealen Kondensator beschrieben werden kann. [Max08b]. Das Ersatzschaltbild ist in Abbildung 3-15 dargestellt. Das Spannungsverhalten an den Klemmen ist damit proportional zur gespeicherten Ladungsmenge Q_{DSK} und ergibt sich zu:

$$U_{a,DSK} = Q_{DSK} \cdot C - R_{i,DSK} \cdot I. \quad (3.51)$$

Der Energieinhalt des Kondensators ist proportional zum Quadrat der Spannung. Es gilt:

$$E_{\text{DSK}} = 0,5 \cdot C \cdot U_{i,\text{DSK}}^2. \quad (3.52)$$

Der energetische Ladungszustand SOC wird damit über

$$\text{SOC}_{\text{DSK}} = \frac{U_{i,\text{DSK}}^2}{U_{\text{nom},\text{DSK}}^2} \quad (3.53)$$

bestimmt.

3.7.3 Lade-/Entladeströme

Für die Definition zulässiger Lade- und Entladeströme sind die Spannungs- und Stromrestriktionen maßgebend. Bei Li-Ionen-Batterien kommt in der Regel ein IUa-Ladeverfahren (Strom-Spannungs-Abschalt-Ladeverfahren) zum Einsatz (Abbildung 3-17). Dabei wird über einen weiten Ladungsbereich mit konstantem Strom geladen. Oberhalb eines bestimmten Ladezustands muss die Ladespannung aus Sicherheits- und Lebensdauergründen konstant gehalten werden, was zu einer stark verminderten Ladegeschwindigkeit führt. Deshalb wird dieser Bereich für Hybridanwendungen mit Rekuperationsfunktionalität in der Regel nicht genutzt. NiMH- und NiCd-Batterien werden allein über ein Strom-Abschalt-Ladeverfahren geladen, weshalb nur Strombegrenzungen auftreten ([JW06], S. 177).

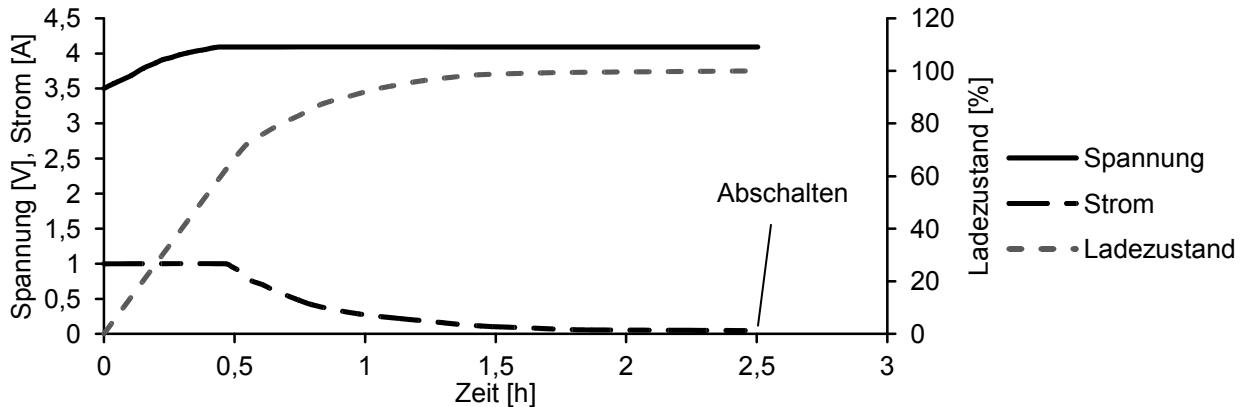


Abbildung 3-17: IUa-Ladung für eine Lithium-Ionen-Zelle ($Q_{\text{nom}}=1 \text{ Ah}$) (nach [JW06], S. 195)

Der Ladestrom ist limitiert, da eine unzulässige Erwärmung der Zelle und eine starker Zellverschleiß vermieden werden sollen. Die Grenzen liegen weit unter dem Maximalstrom, welcher durch Leistungsanpassung an den äquivalenten Innenwiderstand des elektrischen Speichers erreicht werden kann. Deshalb werden vom Hersteller Stromgrenzen für definierte Zeiträume angegeben. Bei Doppelschichtkondensatoren sind diese in der Regel für Lade- und Entladevorgänge identisch. Bei Hochenergiebatterien kann es je nach Typ Unterschiede bis Faktor zehn geben ([JW06], S. 132). Diesem Umstand wird in der Simulation über die getrennte Definition des maximalen Lade- und Entladestroms Rechnung getragen.

3.7.4 Leistungsbestimmung und Verluste

Über den Strom kann die korrespondierende virtuelle innere Speicherleistung bestimmt werden:

$$P_{\text{SPE},i} = U_i \cdot I. \quad (3.54)$$

Diese wird für die Bestimmung des energetischen Ladezustands genutzt:

$$\text{SOC}(t_1) = \text{SOC}(t_0) + \int_{t_0}^{t_1} \frac{P_i(t)}{E_{\text{nom}}} dt. \quad (3.55)$$

Die Begrenzung der inneren Speicherleistungen

$$\begin{aligned} 0 < P_{i,l}(t) &< P_{i,l,\max} \quad \text{und} \\ P_{i,entl,max} &< P_{i,entl}(t) < 0 \end{aligned} \quad (3.56)$$

erfolgt über die zulässigen Lade- und Entladeleistungen. An den Klemmen tritt jedoch eine Leistung

$$P_{\text{SPE},a} = U_a \cdot I = P_{\text{SPE},i} - R_i \cdot I^2. \quad (3.57)$$

auf, welche um die Speicherverlustleistung korrigiert ist. Damit kann auch der Wirkungsgrad des Speichers repräsentiert werden, dieser bestimmt sich zu:

$$\eta_{\text{SPE}} = \begin{cases} \frac{P_{\text{SPE},a}}{P_{\text{SPE},i}} = 1 - \frac{R_i \cdot I}{U_i} = 1 - \frac{R_i \cdot P_{\text{SPE},i}}{U_i^2} & \text{Entladen} \quad P_{\text{SPE},i} < 0 \\ \frac{P_{\text{SPE},i}}{P_{\text{SPE},a}} = \frac{U_i^2}{U_i^2 + P_i \cdot R_i} = \frac{1}{1 + \frac{P_{\text{SPE},i} \cdot R_i}{U_i^2}} & \text{Laden} \quad P_{\text{SPE},i} < 0 \end{cases}. \quad (3.58)$$

3.7.5 Thermisches Verhalten

Das thermische Verhalten hat großen Einfluss auf die Alterung und Leistungsfähigkeit des Speichers. Bei Batterien nimmt die Lebensdauer bei hohen Temperaturen die rapide ab ([Ros09], [Geo09]), während bei tiefen Temperaturen die Leistungsfähigkeit der Zellen stark eingeschränkt ist ([JW06], S. 137). Damit ergibt sich für Li-Ionen-Batterien im Betrieb ein optimaler Arbeitsbereich in einem Temperaturfenster von 20 bis 30 °C. Dieser Temperaturbereich stellt auch bei Doppelschichtkondensatoren den besten Kompromiss zwischen Leistungsfähigkeit und langer Lebensdauer dar [Max08b]. Bei NiMH-Batterien sind 10 bis 25 °C optimal ([JW06], S. 98). Je nach Umgebungsbedingungen zieht dies ein Heizen oder Kühlen der Batterie nach sich. Verschiedene Möglichkeiten zur Temperierung von Batteriemodulen sind in der Literatur beschrieben ([JZS+10], [Hec09]).

Es ist davon auszugehen, dass die elektrischen Speicher in einem günstigen Temperaturfenster betrieben werden können. Das Kühlkonzept oder zumindest die Dimensionierung muss spezifisch an die Einsatzregion angepasst werden. Die Effizienz des Kühlsystems ist stark von dem verwendeten Prinzip und der Dimensionierung abhängig. Bei der dieselelektrischen Lokomotive kann zumindest ein Großteil der zur Temperierung notwendigen Energie während der Bremsphasen aus der Reku-

peration gewonnen werden.³⁴ Deshalb wird der Energieaufwand für die Kühlung in diesem Detailierungsgrad vernachlässigt.

3.7.6 Alterungsverhalten

Die Alterung von Batterien ist ein komplexer Vorgang und von vielen Faktoren wie der Art der Belastung, der Zellchemie, dem Aufbau der Zelle und der Module und dem Kühlsystem abhängig. Bei Einhaltung der vorgegebenen Stromgrenzen (Abschnitt 3.7.3) und unter Annahme einer zuverlässigen Temperierung der Zellen (Abschnitt 3.7.5) kann die Alterung grundsätzlich in zyklische Alterung und kalendarische Alterung unterschieden werden [Sch08b]. Folgen sind ein Abfall der Kapazität und die Erhöhung des Innenwiderstands. Für die Definition der Lebensdauer werden für beide Kenngrößen zulässige Veränderungen dieser beiden Parameter definiert.

Zyklische Alterung

Zur Prädiktion der zyklischen Alterungsgrenze wird vom Hersteller die zulässige Anzahl der Nennladungsumsätze $N_{\text{Zyklen},\max}$ in Abhängigkeit von der Entladetiefe DOD angegeben:

$$N_{\text{Zyklen},\max} = f(\text{DOD}). \quad (3.59)$$

Der Zusammenhang ist in Abbildung A-1 für verschiedene Speichertechnologien dargestellt. Die darin definierte Zyklenzahl N_{Zyklen} kann nun über das Integral des Stroms wie folgt bestimmt werden:

$$N_{\text{Zyklen}} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} |I| dt}{2 \cdot Q_{\text{nom}}}. \quad (3.60)$$

Kalendarische Alterung

Die Grenzen für die kalendarische Alterung werden nach spezifischen Betriebsbedingungen angegeben. Sie kann bei Hybridfahrzeugen mit der hohen zyklischen Belastung als unkritisch angesehen werden. So gibt beispielsweise die Fa. Saft für Hochleistungszellen (VL 20P) 20 Jahre bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C und 10 bis 15 Jahre bei einer Umgebungstemperatur von 40 °C an [Sch08b].

3.8 Grundlegende Programmbausteine

3.8.1 MATLAB-GUI und Datenaufbereitung

Die Dateneingabe in MATLAB erfolgt über eine selbst erstellte grafische Benutzeroberfläche. Diese erlaubt eine komfortable und übersichtliche Eingabe der Simulationsparameter, welche auch

³⁴ Für die Nutzung als elektrisch betriebenes Temperierungssystem für das Heizen und Kühlen mit sehr schnellen Ansprechzeiten bieten sich Varianten mit thermoelektrischen Modulen an, welche mit einem konventionellen Kühlssystem kombiniert werden können [JZS+10].

geladen und abgespeichert werden können. Die Eingabe ist in thematisch sortierte Registerkarten eingeteilt. Die Ausgabe läuft zumeist über Diagramme bzw. Textausgaben. Eine beispielhafte Bildschirmkopie ist in Abbildung 3-18 dargestellt.

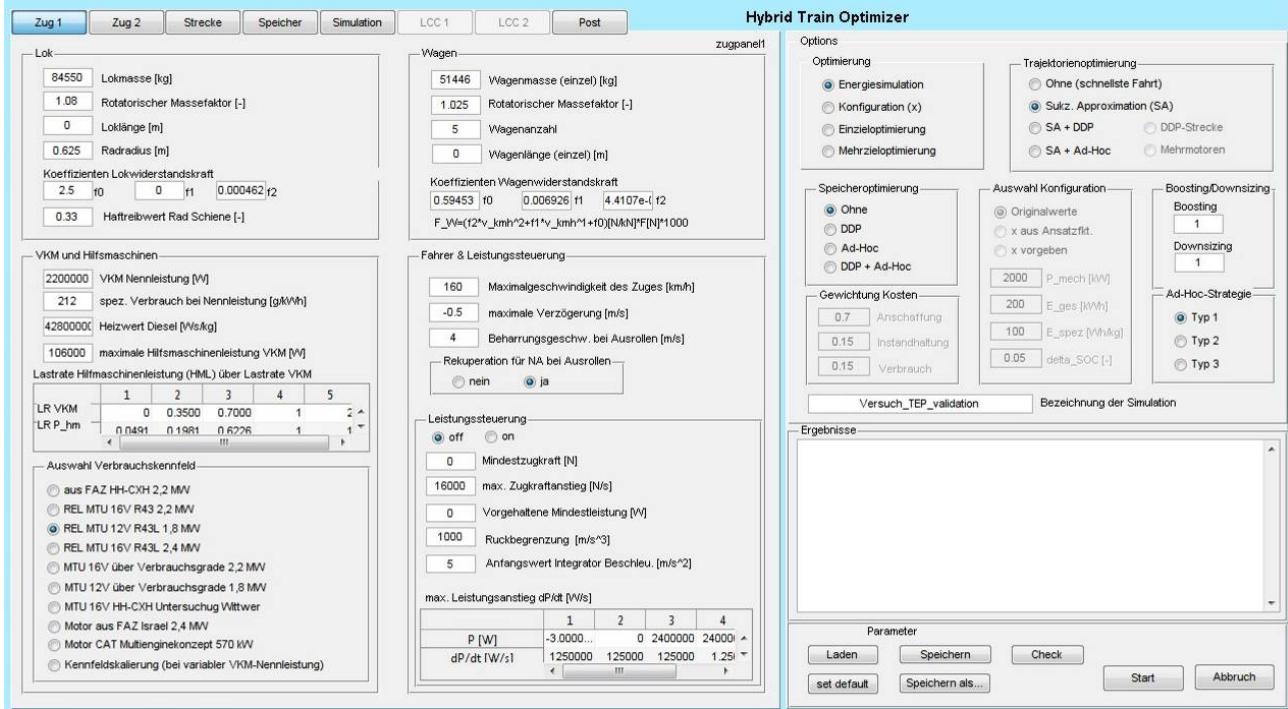


Abbildung 3-18: Programmbenutzeroberfläche (Registerkarte: Zugparameter 1)

Parallel kann die Eingabe jedoch auch durch ein Initialisierungsprogramm erfolgen, welches Parameterdateien einliest. Es wird eine Datenstruktur erstellt, die alle relevanten Simulationsparameter enthält. Diese wird in einer Preprozessor-Routine für die Simulation aufbereitet. Durch Veränderung von ausgewählten Parametern in einem Stapelverarbeitungsskript ist die Durchführung von Parametervariationen möglich.

3.8.2 Aufstellen des Belastungsprofils aus Streckendaten

Für die Berechnung der Fahrdynamik müssen Streckendaten hinterlegt werden. Diese können z. B. aus eigenen Messungen mit GPS-Geräten oder aus Streckendaten von Betreibern gewonnen werden. Für die Streckendaten wurde eine Konvertierungsfunktion geschaffen, mit der Daten von Betreibern eingelesen werden können. Dabei werden die für die Fahrdynamik relevanten ortsabhängigen Informationen herausgefiltert, diese sind die Höchstgeschwindigkeit, Krümmung, Haltepunkte und Neigung. Im Folgenden müssen manuell die für den Betrieb relevanten Haltepunkte, die Wagengmasse zur Berücksichtigung von schwankenden Beladungszuständen und die Haltezeiten ergänzt werden. Es entsteht eine Tabelle mit dem folgenden Aufbau:

Tabelle 3-2: Aufbau einer Streckendatei

Strecke kumuliert	Strecke Abschnitt	v_{\max}	Wagenmasse	Steigung	Bogenradius	Standzeit
[km]	[m]	[km/h]	[t]	[Promille]	[m]	[s]
0,3	300	40	315	0	0	0
1	700	30	315	0	0	0
..

Für die korrekte Abbildung der Fahrt ist die Veränderung der Geschwindigkeitsrestriktionen notwendig. Die Betrachtung des Zuges als Massepunkt lässt die Bedingung außer Acht, dass der Zugführer erst nach Verlassen eines Geschwindigkeitsabschnitts durch den kompletten Zug auf eine höhere Geschwindigkeit beschleunigen darf.

Es wird demnach die Konvention getroffen, dass der mit $s(t)$ bezeichnete Streckenpunkt die Lage des Schwerpunkts charakterisiert. Die Schwerpunktlage des Zugverbands wird vom Zugverbandsende aus in s-Richtung über

$$s_a = \sum_{i=1}^n s_{\text{Sp},i} \cdot m_i \quad (3.61)$$

definiert. Über die Länge des Zugverbands l_{ZUG} kann korrespondierend s_b bestimmt werden:

$$s_b = l_{\text{ZUG}} - s_a. \quad (3.62)$$

Prinzipiell wird die Position von reduzierter Höchstgeschwindigkeit $s_{\text{red},\text{orig}}$ um die Strecke s_b zurückversetzt und alle Punkte mit steigender Höchstgeschwindigkeit $s_{\text{st},\text{orig}}$ um s_a vorverlegt (Abbildung 3-19):

$$\begin{aligned} s_{\text{red,neu}} &= s_{\text{red,orig}-s_b} \text{ und} \\ s_{\text{st,neu}} &= s_{\text{st,orig}+s_a}. \end{aligned} \quad (3.63)$$

Über einen Algorithmus werden auch kleine Abstände zwischen Geschwindigkeitsänderungen abgefangen. Zum Beispiel werden Bereiche mit höherer Endgeschwindigkeit, die kürzer als die Zuglänge sind, nicht berücksichtigt.

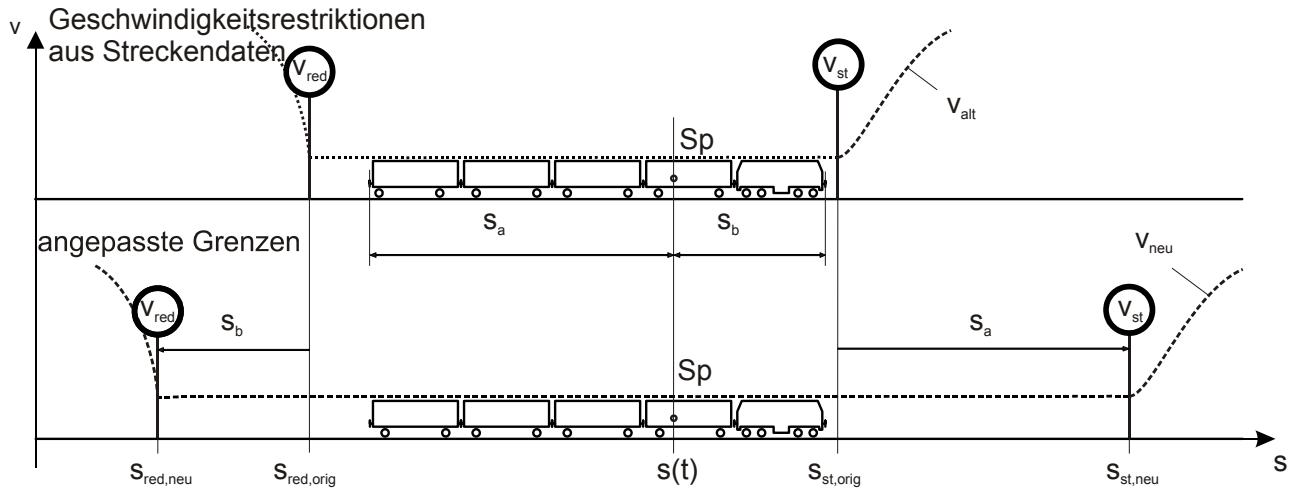


Abbildung 3-19: Anpassung der Geschwindigkeitsrestriktionen an die Zuglänge (nach [Wit11])

3.8.3 Erstellung des Fahrprofils

In einem nächsten Schritt muss nun ein Fahrprofil erstellt werden. Die Grundgleichungen der Fahrdynamik wurden bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben. Die Veränderung der Streckenwiderstände über dem Fahrweg legt für die Berechnung eines Beschleunigungsvorgangs die Umsetzung in einem Wegschrittverfahren nahe. Für die Verbrauchsberechnung sind jedoch die benötigten Leistungen und damit das Zeitverhalten von maßgeblichem Interesse. Weiterhin sollen Fahrzeitanforderungen auf Streckenabschnitten bzw. auf der Gesamtstrecke eingehalten und der Einfluss der zeitabhängigen Verzögerung des Aufbaus der Leistung der VKM untersucht werden. In jedem Fall müssen damit die Zustandsgrößen Weg und Zeit gleichzeitig berechnet werden. Die Genauigkeitsanforderungen beider Größen kann durch die Parametrierung des Integrators eines Berechnungsprogramms sichergestellt werden.

Beim Aufstellen der Gleichungen mit der Zeitbeschreibung tritt die Zeit t als unabhängige Größe auf. Im allgemeinen Fall wird die Bewegungsdifferentialgleichung (3.2) als DGL erster Ordnung

$$\dot{y} = f(y) = \begin{pmatrix} y_1 \\ f(y_1, y_2) \end{pmatrix} \text{ mit } y = \begin{pmatrix} s \\ v \end{pmatrix} \quad (3.64)$$

mit den Elementen Weg s und Geschwindigkeit v aufgestellt. Während der „Beschleunigung mit maximal verfügbarer Zugkraft“ wird die Beziehung um eine Leistungsanstiegsbegrenzung und eine Kraftanstiegsbegrenzung erweitert. Der Zustandsraum erweitert sich um die Leistung des Verbrennungsmotors P_{VKM} und die Zugkraft F_T :

$$\dot{y} = f(y) = \begin{pmatrix} y_1 \\ f_1(y_1, y_2, y_3, y_4) \\ f_2(y_3) \\ f_3(y_2, y_4) \end{pmatrix} \text{ mit } y = \begin{pmatrix} s \\ v \\ P_{VKM} \\ F_T \end{pmatrix}. \quad (3.65)$$

Die Zugkraftanstiegsbegrenzung übernimmt dabei primär die Funktion der Ruckbegrenzung. Während einer Fahrt treten verschiedene Fahrregime auf, die über einen bestimmten Zeitraum das

Fahrverhalten charakterisieren. Von diesen ist die Ermittlung der Fahrzeugbeschleunigung abhängig. Sie wird definiert über:

$$a = \begin{cases} \frac{\min[F_{T,v,\max}(v), F_{T,P,\max}(P), F_{T,F,\max}(P)] - F_W(s, v)}{m_{ZUG,dyn}} & \text{max. Beschleunigung} \\ \frac{a_{B,norm}}{m_{ZUG,dyn}} & \text{normale Verzögerung} \\ \frac{-F_W(s, v)}{m_{ZUG,dyn}} & \text{reines Ausrollen} \\ -\frac{F_W(s, v) + F_{Rekuperation}(v)}{m_{ZUG,dyn}} & \text{Ausrollen mit Rekuperation} \end{cases}. \quad (3.66)$$

Die während der Beschleunigung mit maximaler Zugkraft auftretenden Zugkraftbegrenzungen können über

$$\begin{aligned} F_{T,v,\max} &= F_{T,\max}(v), \\ F_{T,P,\max} &= [(P_{VKM} - P_{HM}) \cdot \eta_{GEN,ges}(P_{GEN}) - P_{HA}] \cdot \eta_{Antrieb}(v, P_{Rad}) \text{ und} \\ F_{T,F,\max} &= F_{RS,\max} \end{aligned} \quad (3.67)$$

beschrieben werden. Die Änderung der weiteren Zustandsgrößen wird während der Beschleunigungsphasen wie folgt bestimmt:

$$\begin{pmatrix} \dot{P}_{VKM} \\ \dot{F}_{T,F} \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{cases} \dot{P}_{VKM,\max}(P_{VKM}) & \text{für } P < P_{VKM} \\ 0 & \text{für } P \geq P_{VKM} \end{cases} \\ \begin{cases} \dot{F}_{T,F,\max} & \text{für } F < F_{\max}(v) \\ 0 & \text{für } F > F_{\max}(v) \end{cases} \end{cases}. \quad (3.68)$$

Wirkungsgradbestimmung

Der Antriebswirkungsgrad $\eta_{Antrieb}$ und der Generatorgesamtwirkungsgrad $\eta_{GEN,ges}$ wurden bereits eingeführt. Die Ermittlung der Wirkungsgrade soll im Folgenden konkretisiert werden. Der Generatorgesamtwirkungsgrad wird bestimmt über:

$$\eta_{GEN,ges}(P_{GEN,el,AC}) = \frac{P_{GEN,el,DC}}{P_{GEN,mech}} = \eta_{GEN} \cdot \eta_{B6}. \quad (3.69)$$

Der Antriebswirkungsgrad setzt sich zusammen aus dem Wirkungsgrad des Pulswechselrichters η_{PWR} , des Fahrmotors η_{FM} und des Getriebes η_{GET} :

$$\eta_{Antrieb}(P_{FM,mech}, \eta_{FM}) = \frac{P_{RS}}{P_{FM,el,DC}} = \eta_{PWR} \cdot \eta_{FM}(P_{FM,mech}, \eta_{FM}) \cdot \eta_{GET}. \quad (3.70)$$

Die Darstellung der Verluste erfolgt primär über Wirkungsgradkennfelder, welche die anschaulichste Form der Verlustabbildung darstellen. Bei Aggregaten mit einem sehr hohen Verbrauch bei

Nulllast, wie dem Dieselmotor, ist allerdings die Implementierung über Willanskennlinien zielführender [GS07].

Die Zustandsgrößen sind so angepasst, dass Sie bei der Verbrauchsbestimmung über die Effect-Cause-Formulierung unproblematisch verwendet werden können. Die Vorwärtsrechnung zur Erstellung von Fahrschaubildern muss durch die implizite Formulierung der Gleichungen dagegen iterativ gelöst werden.

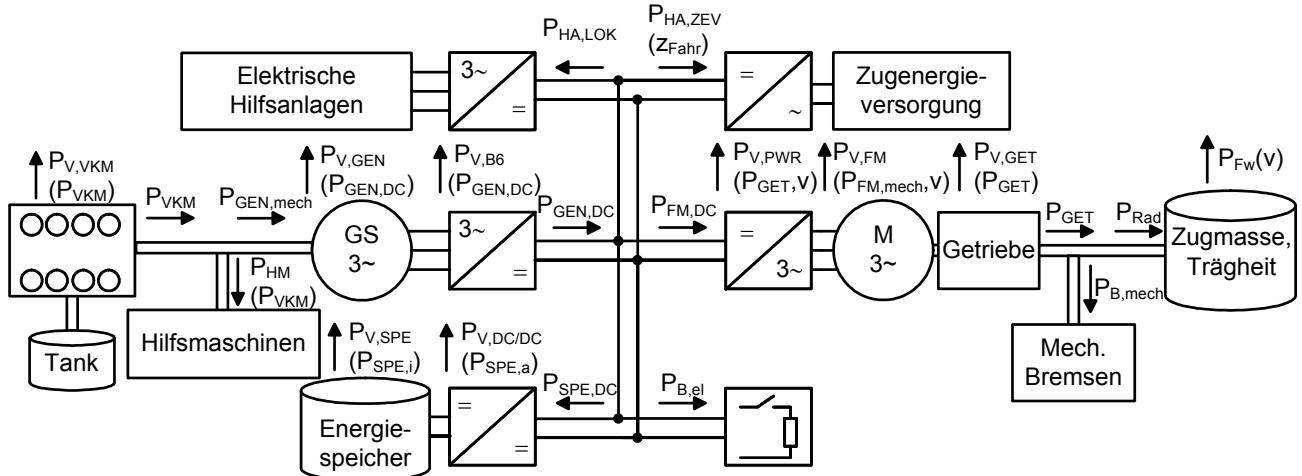


Abbildung 3-20: Leistungsdefinition und Verlustabbildung im dieselektrischen System

3.8.4 Leistungsbereitstellung und Verbrauchsrechnung

Die Verbrauchsberechnung ist als Effect-Cause-Simulation aufgebaut. Die einzelnen Wirkungsgradberechnungen erfolgen auf Basis quasistatischer Gleichungen. Nichtsdestotrotz ergibt sich durch den Einbau des Energiespeichers ein dynamisches System. Der dazugewonnene Freiheitsgrad in der Leistungsverteilung wird durch einen Zwischenkreisalgorithmus berechnet. Die Leistungsbilanz aller i Verbraucher am Zwischenkreis muss in jedem Zeitschritt ausgeglichen sein:

$$\sum_1^j P_{DC,i} = 0. \quad (3.71)$$

Diese Forderung ergibt sich aus der sehr geringen Kapazität und der daraus folgenden geringen Fähigkeit eines Leistungsausgleichs des Zwischenkreiskondensators (Abschnitt 3.6.2).

Die Berechnungsschritte unterteilen sich in die Ermittlung der elektrischen Leistungsanforderung, die Steuerung der Leistungsbereitstellung, die Verteilung von Leistungsüberschüssen und die Verbrauchsberechnung. Abbildung 3-21 zeigt ein Schema der Herangehensweise. Die Umrechnung der Leistungsvorschriften in den einzelnen Zweigen ist in dem Abschnitt 3.6 Abbildung der Elemente dargestellt.

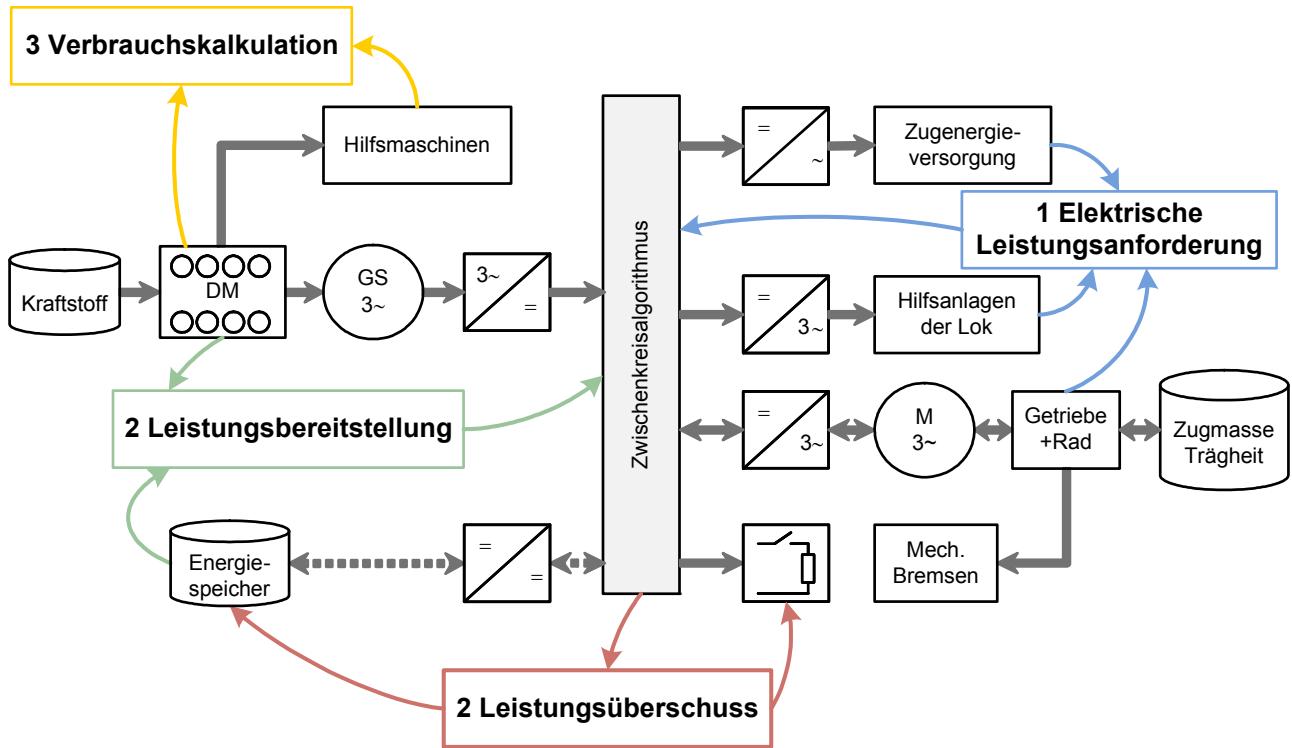


Abbildung 3-21: Blockschaltbild Leistungs- und Verbrauchskalkulation

Berechnung der elektrischen Leistungsanforderung

Die elektrische Leistungsanforderung ergibt sich aus der Summe der durch den Fahrzustand definierten Verbraucher am Zwischenkreis. Da die Fahrmotoren rückspeisefähig sind, kann diese jedoch auch negativ werden. Die folgende Beziehung muss erfüllt sein:

$$P_{\text{Last,DC}} = P_{\text{FM,DC}}(v, P_{\text{Fw}}, P_{\text{B,mech}}) + P_{\text{HM,LOK}} + P_{\text{HM,ZEV}}. \quad (3.72)$$

Berechnung der Leistungsbereitstellung bzw. des Leistungsüberschusses

Die Leistungsbereitstellung wird über das Genset bzw. die elektrischen Speicher abgedeckt. Dabei muss nach (3.71) die berechnete Last der Verbraucher abgedeckt werden:

$$P_{\text{GEN,DC}}(u_1) - P_{\text{SPE,DC}}(u_2) - P_{\text{B,el}}(u_3) = P_{\text{Last,DC}}. \quad (3.73)$$

Durch die entsprechenden Freiheitsgrade ergibt sich ein Steuerungsproblem (Steuergrößen $u_{1..3}$). Die verwendeten zustandsabhängigen bzw. vorausschauenden Steuerungsstrategien werden in diesem Berechnungsblock hinterlegt. Die entsprechenden Leistungsgrenzen sind dabei einzuhalten.

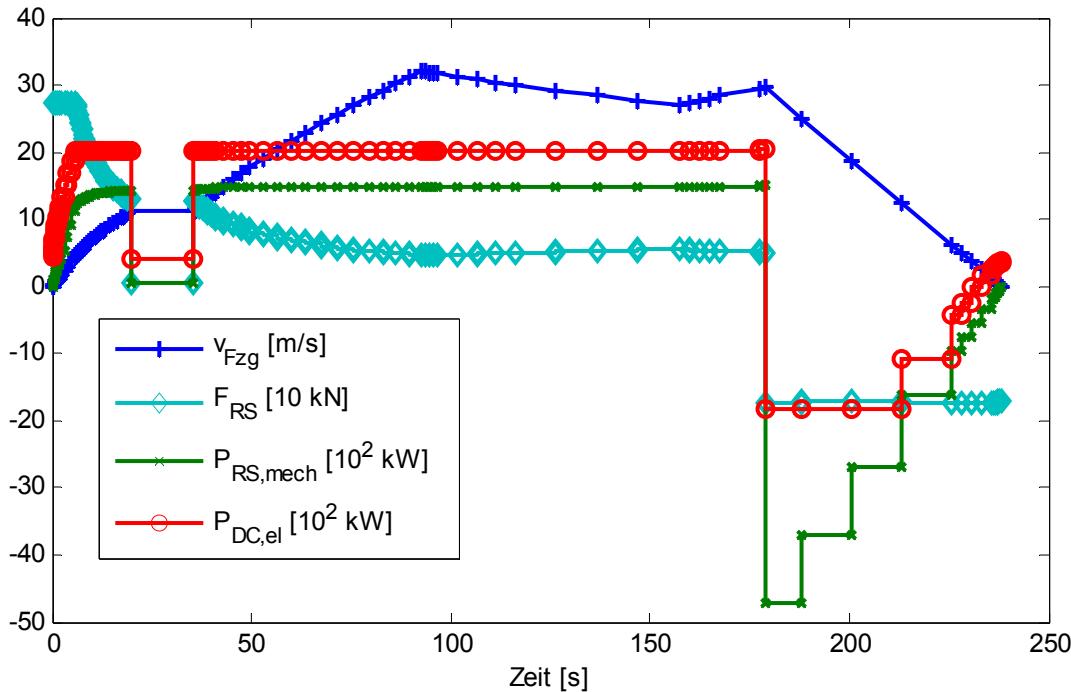


Abbildung 3-22: Ausgabe einer Berechnung der Zwischenkreisleistung ausgehend von der Fahrzeuggbewegung und den Radkräften

Berechnung des Kraftstoffverbrauchs

Die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs erfolgt in einem separaten Teilprogramm unter Berücksichtigung der gestellten Zwischenkreisleistung $P_{GEN,DC}$ analog zu Gleichung (3.16) und (3.17):

$$\dot{m}_{Kr} = f(P_{GEN,DC}, P_{HM}). \quad (3.74)$$

Der Kraftstoffmassenstrom kann über das Fahrspiel zu einem Gesamtverbrauch kumuliert werden und ermöglicht die Bewertung von Fahr- und Betriebsstrategien hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs.

3.8.5 Speicherdefinition

Die Beschreibung der auf dem Fahrzeug vorhanden Energiespeicher erfolgt über die Vorgabe der nutzbaren Speicherenergie oder alternativ der zur Verfügung stehenden Speichermasse zur Definition der Speichergröße. Es wird von einer guten Skalierbarkeit der Speichermodule ausgegangen, die bei Betrachtung von Batterien und Kondensatoren gegeben ist.

Des Weiteren muss eine vorgegebene Speichereinheit definiert werden, welche eine Einzelzelle, ein Speichermodul oder auch eine komplette Speichereinheit darstellt. Die Speichereinheit wird über folgende Angaben beschrieben, welche sich in der Regel aus Datenblattangaben ableiten lassen:

- maximale Ladeleistung $P_{SE,i,l,max}$,
- maximale Entladeleistung $P_{SE,i,entl,max}$,
- Nennspannung $U_{SE,nenn}$,

- Innenwiderstand $R_{SE,i}$,
- Speichermasse m_{SE} und
- Nennenergieinhalt $E_{SE,nenn}$.

Weiterhin muss ein Massefaktor

$$k_{m,SE} = \frac{m_{SPE,ges}}{m_{SE}} \quad (3.75)$$

für die Berücksichtigung des prognostizierten Mehrgewichts des kompletten Speichersystems³⁵, der Speichertyp (Kondensator, Li-Ionen-Batterie) und der gewünschte Ladezustandsbereich definiert werden. Aus den Angaben ist bei Vorgabe der zu speichernden Energiemenge E_{soll} die Modulzahl n_{SE} :

$$n_{SE} = \frac{E_{soll}}{E_{SE} \cdot DOD} \quad (3.76)$$

bzw. bei Vorgabe der Speichermasse $m_{SPE,soll}$:

$$n_{SE} = \frac{m_{SPE,soll}}{m_{SE} \cdot k_{m,SE}}. \quad (3.77)$$

Über die Modulzahl erfolgt nun die Definition der ladezustandsabhängigen Leistungsgrenzen:

$$\begin{aligned} P_{i,l,max} &= P_{SE,i,l,max} \cdot n_{SE} \\ P_{i,entl,max} &= P_{SE,i,entl,max} \cdot n_{SE}. \end{aligned} \quad (3.78)$$

Die Beziehungen (3.54) bis (3.58) werden zur Bestimmung der Speicherverluste und der äußeren Speicherleistung implementiert. Bei der Zusammenschaltung von Speichern unter Vernachlässigung der Übergangsverluste kann man sich dabei zu Nutze machen, dass unabhängig von der Reihen- oder Parallelschaltung eines Speichers die Verluste bei einer bestimmten Leistung nur abhängig von der Speicheranzahl sind. Damit ergibt sich unter Berücksichtigung von $R_{SE,i} / U_{SE,i}^2$ die äußere Speicherleistung an den Klemmen $P_{SPE,a}$:

$$P_{SPE,a} = U_a \cdot I = \begin{cases} P_{SPE,i} \cdot \left(1 - \frac{R_{SE,i}}{U_{SE,i}^2} \cdot \frac{P_{SPE,i}}{SOC \cdot n_{SE}} \right) & \text{für Doppelschichtkondensatoren} \\ P_{SPE,i} \cdot \left(1 - \frac{R_{SE,i}}{U_{SE,i}^2} \cdot \frac{P_{SPE,i}}{n_{SE}} \right) & \text{für Batterien} \end{cases}. \quad (3.79)$$

³⁵ Für die Berechnung der Masse des kompletten Speichersystems muss je nach Art der vordefinierten Speicher-Einheit (Einzelzelle bzw. Modul) zusätzlich die Masse für die zusätzlich benötigte Verbindungstechnik, die Temperierung, das Batteriemanagementsystem und den Gleichspannungswandler berücksichtigt werden.

3.8.6 Ausgleich des Ladezustands der Speicher

Ein Vergleich der Kraftstoffverbrauchswerte zwischen den einzelnen Versuchen ist nur sinnvoll, wenn das Niveau aller anderen Energiespeicher zu Simulationsende dem Niveau zu Simulationsbeginn entspricht. Dies gilt insbesondere für die nicht streckenprofilabhängigen Speicher, in diesem Fall dem elektrischen Energiespeicher. Der Verlauf des Speicherinhalts von Energiespeichern ist bei Betriebsbedingungen stetig. In den durchgeführten Versuchen wurde der Anfangs-SOC so angepasst, dass er dem End-SOC entspricht. Bei vorrausschauenden Strategien wird dies durch eine Zielvorgabe realisiert. Bei regelbasierten Strategien ohne Vorausschau ist die Anpassung durch eine iterative Annäherung erreichbar.

Dies ist mit vertretbarem Aufwand nur durch eine automatisierte Simulation möglich. In der praktischen Messung muss dieses Problem durch bestmögliche Bestimmung der SOC-Differenz³⁶ und nachfolgendem Ausgleich der gemessenen Verbrauchswerte erfolgen. Die Frage, wie viel „Wert“ eine Energiemenge im Speicher ist, ist nur für die Kombination einer bestimmten Betriebsstrategie mit einem definierten Lastspiel zu beantworten. Bei Fahrten zur Verbrauchsmessung muss mit mittleren Ausgleichsfaktoren gerechnet werden, diese können mit Hilfe der Simulation bestimmt werden [KB11].

3.9 Validierung mit Hilfe von Messdaten

Die Validierung der Simulation ist von hoher Bedeutung für die Gültigkeit der nachfolgenden Untersuchungen. Nachdem der Programmkernel zur Verbrauchsbestimmung bereits in der Arbeit von ASCHOFF [Asc10] durch den Vergleich gegenüber einer Referenzsimulation der Fa. BT getestet wurde, konnte auf Basis der Daten der Messfahrt HH-CXH, die in Abschnitt 2.4 vorgestellt wird, die Simulation am Referenzfahrzeug validiert werden. Durch den Charakter der Gesamtfahrzeugmessung auf Basis von Daten aus dem Fahrzeugbus soll betont werden, dass das Ziel der Nachweis der korrekten Abbildung der Fahrdynamik und die gelungene Integration der wichtigsten Aspekte bezüglich des Leistungsflusses auf dem Fahrzeug darstellt. Die Aufnahme und Überprüfung von Wirkungsgradkennfeldern der Teilkomponenten ist nur eingeschränkt möglich.

3.9.1 Ermittlung der Fahrwiderstandskoeffizienten

Die Bestimmung der korrekten Fahrwiderstandskoeffizienten des Wagenzugs ist von entscheidender Bedeutung für die Bestimmung der Fahrzeiten. Bei Ausschreibungen von Lokomotiven müssen die anzunehmenden Fahrwiderstände und wagenmassenrelevanten Werte im Vorfeld vom Betreiber definiert werden. Die Berechnungen der anbietenden Fahrzeughersteller zum Energiebedarf und den Fahrzeiten werden dadurch vergleichbar und sind nur von der Lokomotive abhängig [Kie09].

Für die eingesetzte Zugkonfiguration auf der Strecke Hamburg-Cuxhaven liegen keine Daten über die Fahrwiderstände der Wagen und der Lokomotive vor. Deshalb werden die Zugwiderstandsko-

³⁶ Bei elektrischen Speichern erfolgt die Ladezustandsbestimmung durch Auswertung der Werte aus dem Speicher managementsystem oder durch Messung der Speicherruhespannung (siehe auch Kapitel 2.6).

effizienten aus den Messdaten ermittelt. Die Ermittlung von Zugwiderstandskoeffizienten bei Ausrollversuchen ist in der Dissertation von LUKASZEWICZ [Luk01] beschrieben. Bei den Messfahrten HH-CXH wurde die Fahrt ohne Beeinflussung des Fahrverhaltens des Fahrers durchgeführt, um möglichst realistische Fahrverläufe zu erhalten. Aufgrund der Nutzung der energiesparenden Fahrweise sind jedoch trotzdem eine große Zahl von Abschnitten traktionskraftfreien Rollens festzustellen. Vorteilhaft ist dabei, dass die Strecke nahezu eben ist, in beide Richtungen befahren wurde und die Strecke nur sehr wenige Kurven mit großen Radien aufweist. Auf dieser Basis wurden die Werte aus den Geschwindigkeitsverläufen in Ausrollphasen ermittelt (Abbildung 3-23). Die sichtbare Streuung der Beschleunigungswerte resultiert aus den Windgeschwindigkeiten von 11 bis 15 km/h³⁷ bzw. geringen Gefälle- und Steigungsabschnitten³⁸. Weit auseinanderliegende Punkte, die schnell in zusammenhängende Punktwolken konvergieren, weisen auf eine unscharfe Abgrenzung der Übergangsbereiche bei der Fahrzustandsabgrenzung zu Beschleunigungs- bzw. Bremsphasen hin.

Zur Ermittlung der Fahrwiderstände wurden die Messpunkte einer Approximation unterworfen. Die Menge der Messdaten wurde dabei auf den Bereich $-0,1 \text{ m/s}^2 < a_{\text{ausroll}} < 0,1 \text{ m/s}^2$ begrenzt, um unplausible Ausreißer zu eliminieren. Für die Ermittlung einer Ausgleichskurve wurden zwei verschiedene Ansätze verwendet. Der erste Ansatz berücksichtigt auch eine geschwindigkeitsproportionale Verzögerung:

$$a_{\text{ABC}} = -(k_{C1} \cdot v^2 + k_{B1} \cdot v + k_{A1}). \quad (3.80)$$

In einem Bericht über die Methoden der Bestimmung des Laufwiderstandes im Eisenbahnbereich ([Gaw92], S. 12) wird die Vernachlässigung des geschwindigkeitsabhängigen Terms empfohlen, da damit eine künstliche Streuung des geschwindigkeitsabhängigen Terms verhindert werden kann. Die These, dass dieser Term weniger reibungsbedingt und stattdessen durch den Luftwiderstand geprägt ist, wird auch in [Luk01] vertreten. In dieser Arbeit konnte keine Abhängigkeit der Kraft von der Anzahl der Achsen festgestellt werden. Aus diesem Grund soll zum Vergleich auch der Ansatz

$$a_{\text{AC}} = -(k_{C2} \cdot v^2 + k_{A2}) \quad (3.81)$$

benutzt werden.

Für die Berechnung der Fahrwiderstände müssen die dynamischen Massenkräfte berücksichtigt werden [siehe Gleichung (3.5)]. Die resultierende Gesamtmasse beträgt 344,901 t und die dynamische Masse 358,045 t (Zusammenstellung siehe Tabelle 2-1 und Tabelle 2-2).

³⁷ Die Wetterdaten wurden täglich aus den Werten für die Wetterstationen Hamburg und Cuxhaven gemittelt.

³⁸ Die Strecke weist eine maximale Steigung von 7 Promille über 600 m auf.

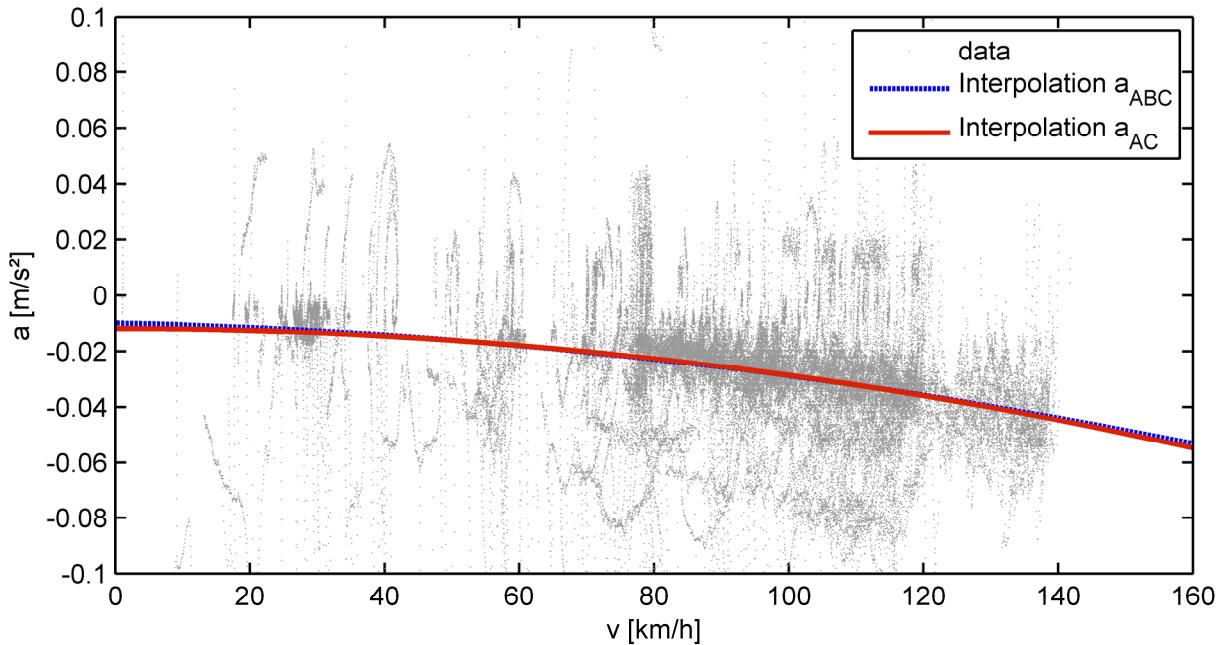


Abbildung 3-23: Beschleunigungsverhalten in Ausrollphasen³⁹

Mit den vorhandenen Parametern kann man nun eine Fahrwiderstandsformel für den Wagenzug bestimmen:

$$F_W = C \cdot v^2 + B \cdot v + A. \quad (3.82)$$

Die entstehenden Werte sind in Tabelle 3-3 aufgeführt.

Tabelle 3-3: Verzögerungskoeffizienten und daraus ermittelte Fahrwiderstandskoeffizienten für zwei verschiedene Approximationsverfahren

	k_1 - siehe (3.80)	k_2 - siehe (3.81)	F_{W1} - siehe (3.82)	F_{W2} - siehe (3.82)
A	0,0098 m/s ² /(km/h) ²	0,0119 [m/s ² /(km/h) ²]	4.260,74 N	3.508,84 N
B	5,5e-5 m/s ² /(km/h)	0 [m/s ² /(km/h)]	0 N	19,677 N
C	1,35e-6 m/s ²	1,67e-6 m/s ²	0,599 N	0,4817 N

Für die weiteren Berechnungen wurde die Fahrwiderstandsgleichung F_{W2} mit geschwindigkeitsproportionalem Term B verwendet. Die ermittelten Werte erwiesen sich in der Validation mit Hilfe der Aufzeichnung der Messfahrten HH-CXH unter Berücksichtigung der vorherrschenden Windgeschwindigkeit als realistisch [Wit11]. Im Vergleich mit Werten aus der Literatur zeigt sich, dass in dortigen Ansätzen sowohl der aerodynamische Widerstand als auch der Grundwiderstand höher spezifiziert wurden (Abbildung 3-24). Qualitativ lässt sich die Abweichung des quadratischen Faktors mit der Verbesserung der Aerodynamik erklären, die sich aus besser gestalteten Wagenübergängen und den heute dauerhaft geschlossenen Fenstern ergibt. Unterschiede beim Grundwiderstand können durch die verbesserte Lagerung der Radsätze und den guten Gleiszustand erklärt werden.

³⁹ Es sind 71.212 Datenpunkte dargestellt, was einer Ausrolldauer von ungefähr vier Stunden entspricht.

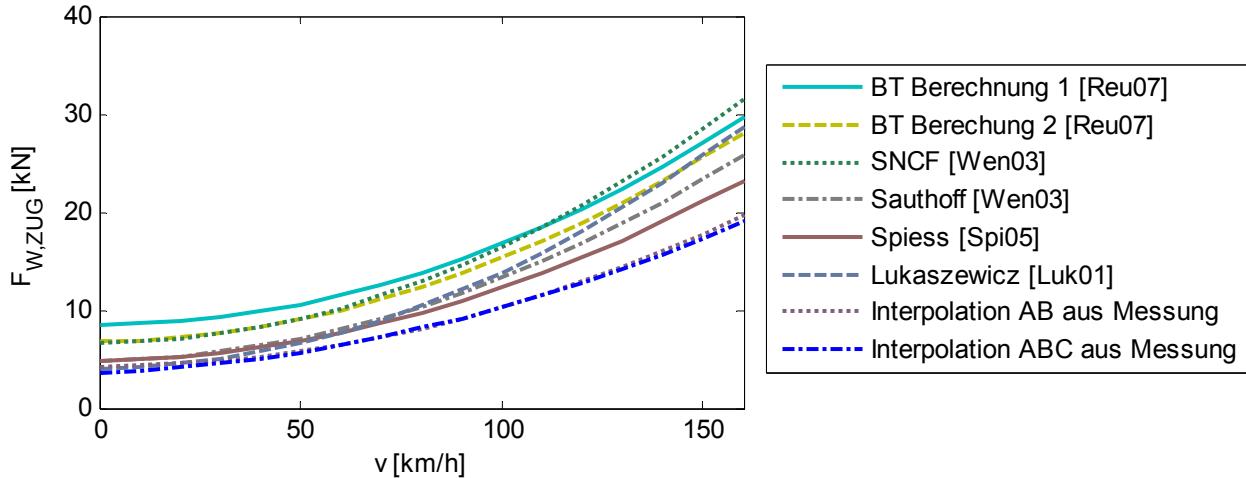


Abbildung 3-24: Vergleich der ermittelten Fahrwiderstände mit Fahrwiderstandsrechnungen⁴⁰

3.9.2 Nachbildung der Fahrregime

Ausrollen

Die korrekte Abbildung des Fahrregimes Ausrollen wird primär über eine exakte Approximation der Fahrwiderstände sichergestellt. In Abbildung 3-25 ist die Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung für drei verschiedene Abschnitte einer Messfahrt dargestellt. Dabei wurde die für diesen Tag vorherrschende Windrichtung berücksichtigt. Der Einfluss des Fahrtwinds auf die Fahrwiderstände ist in der Vergleichsrechnung mit ± 20 km/h ersichtlich. Aus der Abbildung wird ebenfalls ersichtlich, dass die in Abbildung 3-24 dargestellten teilweise doppelt so hohen Fahrwiderstände für diesen Zugverband nicht zutreffend sind.

⁴⁰ Die Fahrwiderstandsrechnungen von BT wurden mit von Kunden spezifizierten Fahrwiderstandsgleichungen für zwei Projekte mit Doppelstockwagenzügen durchgeführt.

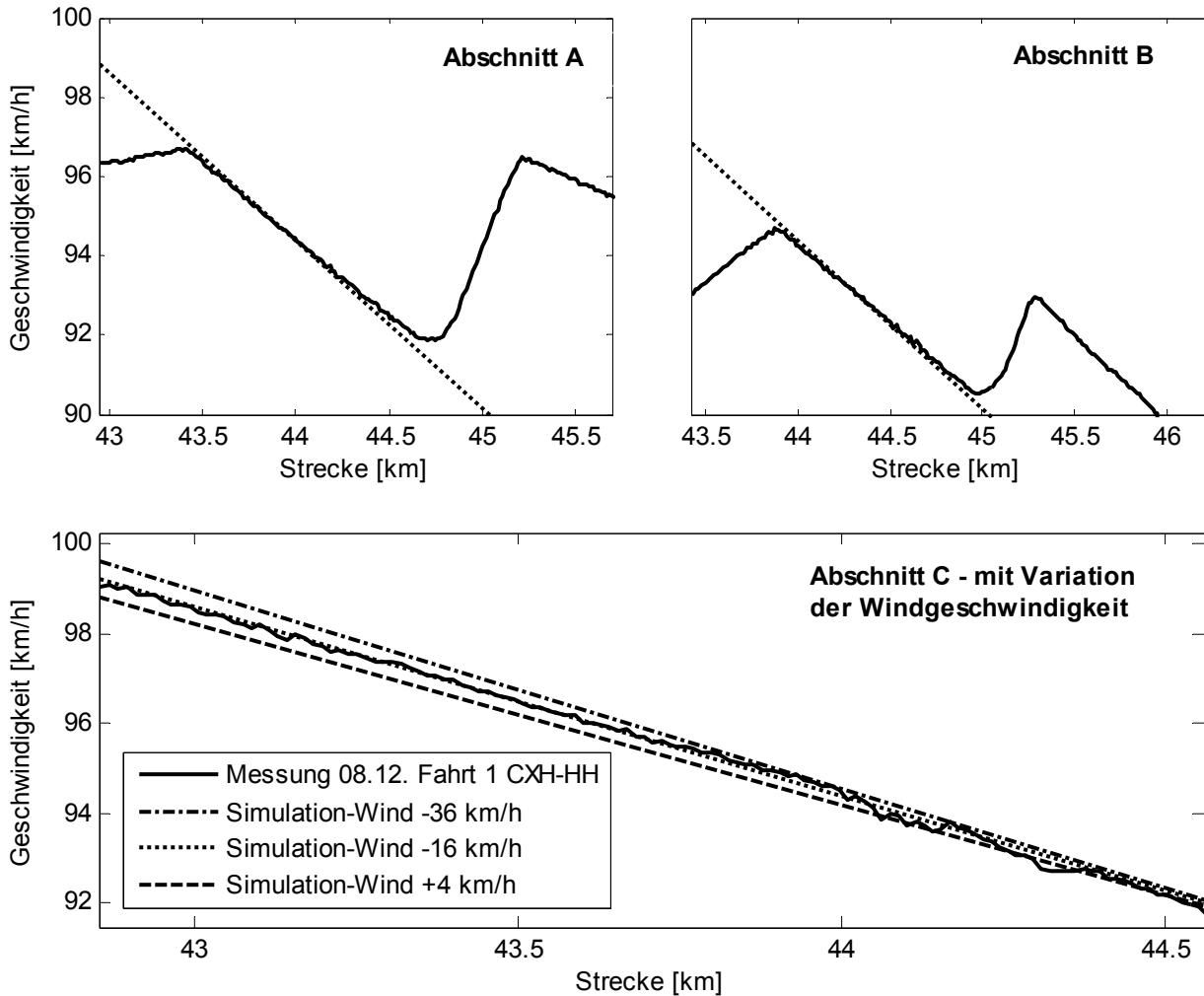


Abbildung 3-25: Ausrollvorgänge, oben: Simulation für die Abschnitte A und B⁴¹; unten: Mit Variation der Windgeschwindigkeit an Ausschnitt C [Wit11]

Vollastbeschleunigung

Vollastbeschleunigungen an der Zugkraftgrenze traten bei den Messfahrten relativ selten auf. Aus Komfortgründen, zur Vermeidung von Schlupf oder im Glauben an eine mögliche Kraftstoffeinsparung bzw. eine Schonung des Fahrzeugs ist bei den aufgenommenen Fahrten dieses Fahrregime selten zu verzeichnen. Für die Validierung ist stellvertretend in Abbildung 3-26 eine Volllastbeschleunigung auf dem Abschnitt zwischen Hammah und Stade, welcher ein charakteristisches streckenabhängiges Widerstandsprofil aufweist (Abbildung A-6), dargestellt. Dabei kann die Wirkung verschiedener Maßnahmen zur Verbesserung der Abbildungsgenauigkeit der Simulation gezeigt werden.

Charakteristisch ist das ruckfreie Anfahren, welches aus der Berücksichtigung der Zugkraftanstiegsbegrenzung resultiert und den Bereich bis 20 Sekunden dominiert. In der Simulation wird ein

⁴¹ Die Kilometrierung ist aus den Ergebnissen der Simulation übernommen. Die tatsächliche Lage der Fahrschnitte A bis C kann in Abbildung A-6 nachvollzogen werden.

Beschleunigungsverlauf berechnet, der sich dem gemessenen Verlauf gut annähert und alle charakteristischen Elemente enthält. In der Abbildung sind zwei weitere Berechnungsergebnisse dargestellt, welche den Einfluss veränderter Parameter darstellen. Wenn die Nebenaggregateleistung falsch angesetzt wird, sind im leistungsdominierten Bereich höherer Geschwindigkeit erhebliche Abweichungen zu erkennen. Im Fall der Nichtberücksichtigung der Gleislage ergibt sich ebenfalls ein anderes Beschleunigungsverhalten, die aus der Hangabtriebskraft resultierende charakteristische Beschleunigung bei ca. 70 Sekunden ist in den Messdaten und der Simulation zu sehen, tritt bei Nichtberücksichtigung jedoch nicht auf. In der Diplomarbeit von WITTWER ([Wit11], S. 86) wurde eine gute Übereinstimmung noch für drei weitere Vollastbeschleunigungen nachvollzogen.

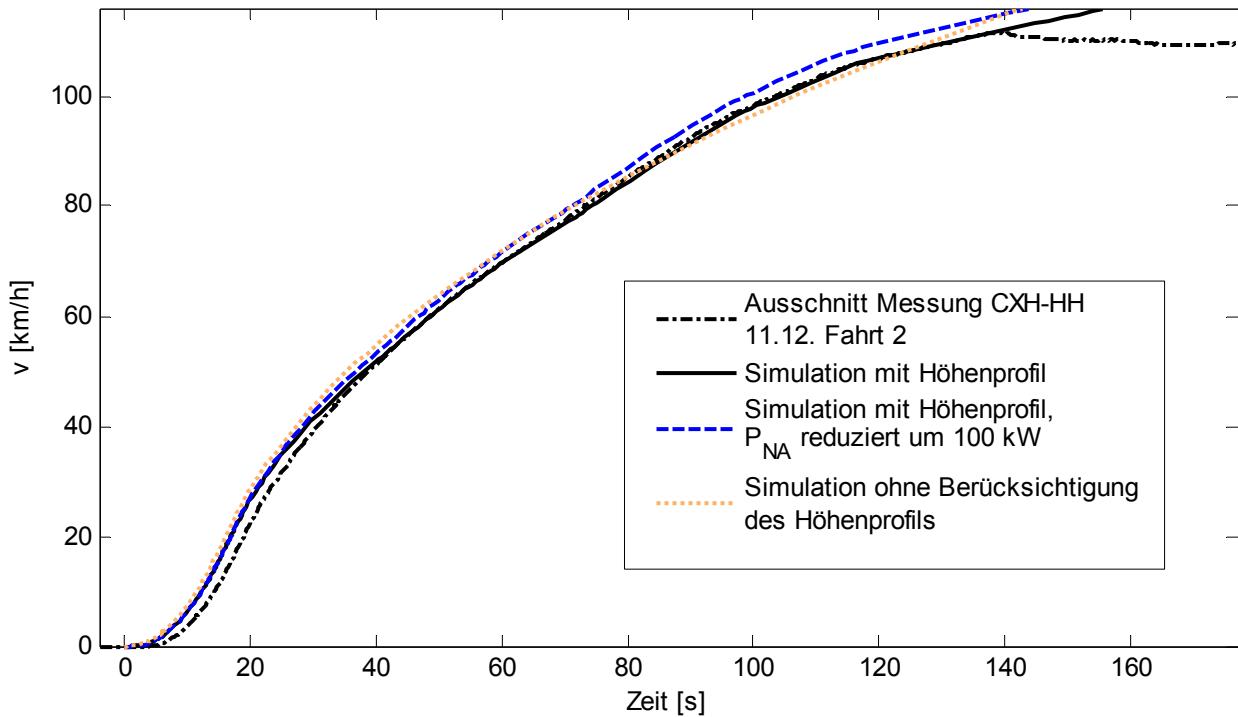


Abbildung 3-26: Vergleich der Vollastbeschleunigung bei Messung und Simulation ([Wit11], S. 60)

3.9.3 Reproduktion einer vollständigen Fahrt

Nach der Validation charakteristischer Fahrregime soll nun der Abgleich eines kompletten Fahrspiels mit der Simulation gezeigt werden, um die Möglichkeit der Abbildung einer realen Fahrt zu diskutieren. Die Umschaltpunkte zwischen den entsprechenden Fahrregimen wurden dabei in der Simulation so angepasst, dass sie mit der Messfahrt gut übereinstimmen. Dabei wurden als Einschränkung zur schnellsten Fahrt die Fahrregime:

- Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit,
- Ausrollen und
- rekuperatives Verzögern

genutzt. Das Fahrregime „rekuperatives Verzögern“ repräsentiert hier ein vom Triebfahrzeugführer eingeleitetes sanftes Einbremsen über die elektrische Bremsfunktion des Zugkrafthebels. Die

Höchstgeschwindigkeit in Konstantfahrabschnitten wurde so gewählt, dass die gleiche Fahrzeit wie in der Messung erreicht wird. Dies gleicht die Unterschiede aus, die aus der nicht vorhandenen Vollastbeschleunigung während der Messfahrt bzw. der nicht abgebildeten Sägezahnfahrt im ersten Abschnitt entstehen (Abbildung 3-27).

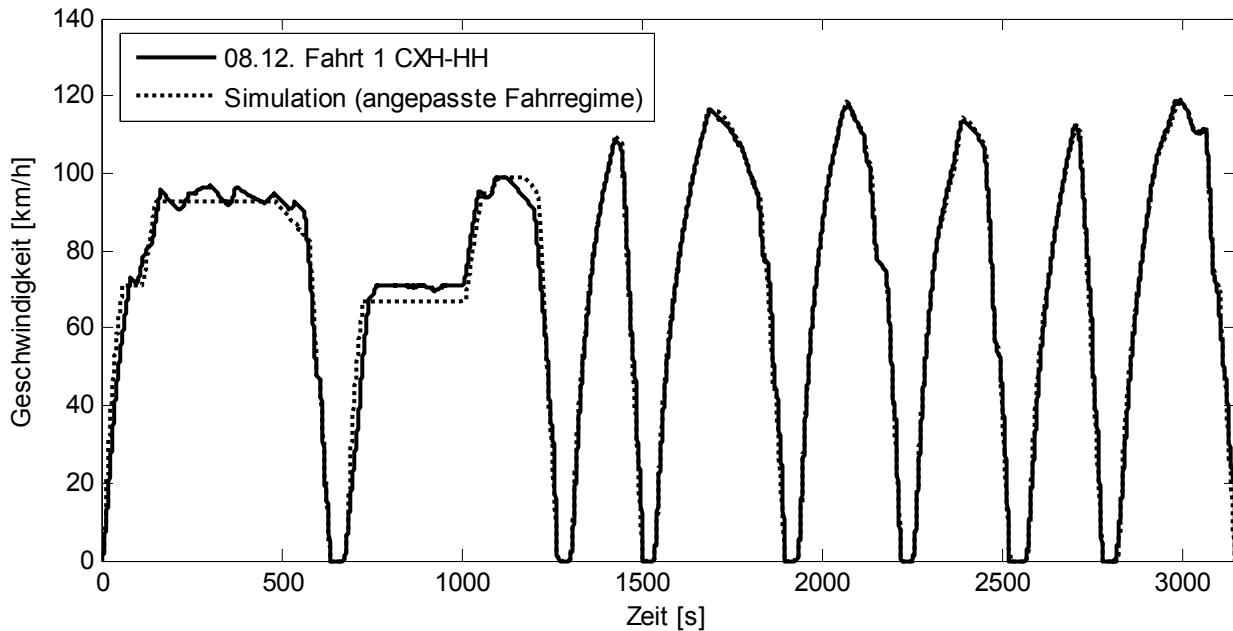


Abbildung 3-27: Vergleich des Fahrtverlaufs zwischen Messfahrt und Simulation unter Anwendung der möglichen Fahrregime

Die Abweichung zwischen Messung und nachgepasster Simulation in der aufgenommenen kumulierten elektrischen Zwischenkreisleistung beträgt 5,3 Prozent. Für die vom Dieselmotor aufzubringende mechanische Energie wurde eine Differenz von 1,4 Prozent ermittelt. Die Unterschied der in einer Nachberechnung aus den Motorlastpunkten von Simulation und Messungen ermittelten Verbrauchswerte beträgt 2,2 Prozent ([Wit11], S. 65 ff.). Für alle Energiewerte ist der Wert der Simulation größer als bei der Messung. Die recht hohe Differenz bei der Zwischenkreisleistung liegt vermutlich am Leistungsfaktor der Nebenaggregate. Für die Zugenergieversorgung und den Hilfsbetriebumrichter standen nur die Werte der Scheinleistung zur Verfügung, welche für den Input der Simulation genutzt werden. Je nach Art der Verbraucher und Leistungselektronik ist jedoch beispielsweise bei Drehstrommotoren auch ein gewisser induktiver Leistungsanteil zu erwarten, der über die Messdaten nicht bestimmt werden kann. Bei der hohen Leistung der Zugsammelschiene und des Hilfsbetriebumrichters ist mit erheblichen Abweichungen zu rechnen.⁴² Insgesamt kann das Ergebnis der Simulation einer realen Messfahrt durch generische Fahrregime als zufriedenstellend bezeichnet werden.

Es muss betont werden, dass die Kalibrierung der Fahrtdata (Beladungszustand, Fahrwiderstand des konkreten Fahrzeugs bei den Wetterbedingungen, Windrichtung, benötigte Heizleistung der

⁴² Bei einem für Drehstrommotoren üblichen $\cos\phi$ von 0,8 beträgt die Wirkleistung nur 80 Prozent der Scheinleistung.

Wagen etc.) sehr anspruchsvoll ist. Für vergleichende Verbrauchs betrachtungen in der Simulation sind diese aber gleich und im Vorfeld zu definieren. Die erreichte Kraftstoffdifferenz bei kleinen Systemanpassungen (z. B. eines effizienteren Nebenaggregats) kann so unter konstanten Randbedingungen zuverlässig bestimmt werden. Dies ist bei Fahrzeugmessungen in der Regel nicht möglich, da die Schwankungsbreite durch die differierende Fahrweise und wechselnde äußere Einflüsse zu groß ist.⁴³

3.9.4 Zusammenfassung

Das erstellte Berechnungsprogramm Hybrid Train Optimizer bildet die Basis zur Untersuchung verschiedener Strategien für die Fahrtgestaltung unter Berücksichtigung der Fahrzeitreserven, den Betrieb des Energiespeichers und der Steuerung von Anlagen mit mehreren Dieselmotorgenerator-sätzen. Neben der Nutzung regelbasierter Strategien werden dabei auch vorausschauende Betriebsstrategien eingesetzt, welche die Möglichkeiten der bei Schienenfahrzeugen im Vorfeld bekannten Streckengeschwindigkeiten und -topologie nutzen (Kapitel 4). Die lebenszykluskostenbasierte Konfigurationsoptimierung wird durch ein Modul realisiert, welches unter Berücksichtigung der Lokkonfiguration und der Energiesimulation für ein vorgegebenes Streckenprofil die Verbrauchs-, Instandhaltungs- und Anschaffungskosten für das Fahrzeug berechnet. Die Kalkulation basiert darauf, dass ein Grundbetrag für die Anschaffungs- und Instandhaltungskosten angesetzt wird und nur die Differenzkosten durch die Konfigurationsänderung des Generatorsatzes und des Energiespeichers berücksichtigt werden (Kapitel 6).

⁴³ Die Standardabweichung bezüglich der mechanischen Leistung am Dieselmotor zwischen den Messfahrten in eine Richtung beträgt 5,3 (Hamburg-Cuxhaven) bzw. 6,7 Prozent (Cuxhaven-Hamburg) [Sch10].

4 Optimierung von Betriebsstrategien von Fahrzeugen mit Energiespeicher

4.1 Zielgrößen und Bewertungskriterien

Die Optimierung der Betriebsstrategien kann unter verschiedenen Kriterien erfolgen. Für eine zu erbringende Transportaufgabe bieten sich Energieverbrauch, Verschleiß, Komfort (Akustik, Körperschall, Querbeschleunigung), Emissionen (Abgase, Lärm), Sicherheit und Pünktlichkeit an. Die höchste Priorität liegt im Eisenbahnbetrieb bei der Sicherheit und nachfolgend bei der Pünktlichkeit.

Die Bahn ist in Deutschland das mit Abstand sicherste Verkehrsmittel. Die betriebsbedingten Unfälle konzentrieren sich vor allem auf Nebenbahnen oder den Rangierbetrieb, bei denen die hohen Sicherheitsstandards des Personenfernverkehrs bezüglich der Zugsicherungssysteme nicht überall eingehalten werden können [All11]. Das Ziel der Pünktlichkeit wird hoch gewichtet, da sie im hohen Maße die Kundenzufriedenheit beeinflusst und der Bahnbetreiber bei erheblichen Verspätungen dem Kunden und, bei Beeinflussung anderer Fahrzeuge, auch dem Wettbewerber gegenüber regresspflichtig ist. Weiterhin müssen die geltenden Normen für Fahrzeugzulassung und Betrieb eingehalten werden. Bezogen auf die Dieselmotoren sind insbesondere die Normen zur Schadstoffemission der Dieselmotoren [EG04] und der Lärmemission in bestimmten Fahrzuständen [DIN05] geregelt. Die genannten Aspekte sind also als Randbedingungen zu verstehen, wenn für andere Fahrzeugeigenschaften eine Verbesserung angestrebt wird.

Der Verschleiß ist für die Fahrzeugbetreiber von großer Bedeutung. Zur Reduktion des Radverschleißes kann die Fahrdynamik mit möglichst moderaten Beschleunigungen und damit geringem Schlupf bei Anfahren und Bremsen beitragen, welche auch für den Passagierkomfort gefordert sind. Der Verschleiß der mechanischen Bremsen wird durch bevorzugte Anwendung der elektrischen Bremse verringert. Um den Komfort für die Fahrgäste weiter zu erhöhen, können die Standgeräusche der Lokomotive in Bahnhofshalten reduziert werden. Ansonsten sind die Passagiere in den Reisezugwagen bei lokomotivbespannten Zügen sowohl von den Schwingungs- als auch von den Lärmemissionen der Lok weitgehend entkoppelt.

Primär bleiben als Zielgrößen damit der Kraftstoffverbrauch und der Verschleiß der Antriebsstrangkomponenten bestehen. Diese beiden Parameter können bezüglich einer gestellten Fahraufgabe in kostenbasierte Kriterien überführt werden. So wird eine bestimmte Fahrt immer bestimmte Kraftstoffkosten und anteilige Instandhaltungskosten nach sich ziehen. Durch die Wahl der Betriebsstrategie können die insbesondere die Instandhaltungskosten eines ggf. vorhandenen Energiespeichers. Kritisch kann sich weiterhin eine starke Verschiebung der Lastanteile⁴⁴ des Dieselmotor-generatorsatzes auswirken. Werden bestimmte vom Hersteller festgelegte Grenzen überschritten, kann sich die Betriebsstundenzahl bis zur Überholung verringern. Belastbare und allgemeingültige

⁴⁴ Die Lastanteile entsprechen der relativen Häufigkeit eines bestimmten Betriebsbereichs des Dieselmotors. Dieser ist häufig über Leistungsgrenzen definiert.

Ansatzfunktionen zur Alterung von Dieselmotoren in Abhängigkeit von den Lastanteilen liegen dem Autor jedoch nicht vor. Zur Vermeidung einer exzessiven Betrachtung aller Bestandteile der Lebenszykluskosten wird im Fall des Verschleißes nur mit den Differenzkosten zur Ausgangskonfiguration gerechnet [SZB11].

Es ergeben sich demnach die Zielfunktionen Kraftstoffkosten und Verschleißkosten. Die Fahrzeit kann bei Annahme eines bestehenden Fahrplans als Randbedingung oder bei nicht vorgegebener Fahrzeit als Zielgröße eingeführt werden.

4.2 Theorie der optimalen Steuerung

Für Optimierungsprobleme mit Differentialgleichungsnebenbedingung, wie sie bei der Zugfahrt- und Verbrauchsrechnung und bei der Speichersteuerung vorliegen, wird die Theorie der optimalen Steuerung verwendet. Es wird im Vorfeld eine bestimmte Solltrajektorie bezüglich der Verlaufsgröße festgelegt, welche bezüglich einer Zielfunktion optimal ist und der Differentialgleichung genügt. In der Praxis muss dann versucht werden, eine solche Solltrajektorie durch die Stellung von Steuergrößen im System umzusetzen, wobei zumeist Reglerstrukturen notwendig sind, um die geplanten Systemzustände sicher einzustellen und damit hinsichtlich der Zielgrößen auch praktisch ein optimales Verhalten zu erreichen sowie gegebene Randbedingungen nicht zu verletzen.

4.2.1 Optimale Steuerung mit spezifiziertem Endzustand

Die Theorie der optimalen Steuerung eignet sich für zeitabhängige Systeme mit den inneren Zuständen $x(t)$ und den Eingangsgrößen $u(t)$, deren Verhalten über die Zustandsgleichung

$$\dot{x} = f(x(t), u(t)) \quad (4.1)$$

beschrieben werden kann. Die Optimierung soll hier für den Spezialfall beschrieben werden, wie er bei Definition eines bestimmten Zeitintervalls $t \in [t_A, t_E]$, eines bestimmten Startzustands $x(t_A) = x_A$ und Endzustands $x(t_E) = x_E$ auftritt, welche gleichzeitig die Randbedingungen für die Optimierung darstellen. Ziel ist es, den Zustandsverlauf im betrachteten Zeitbereich so zu steuern, dass ein gewähltes Kostenfunktional

$$J = \varphi(x(t_E), t_E) + \int_{t_A}^{t_E} p(x(t), u(t)) dt \quad (4.2)$$

minimal wird. Die Bewertung des Zielzustandes und des Zeitraums über die Funktion φ ist unabhängig von der optimalen Steuerung, da bei der gegebenen Aufgabe der Endzustand und der einzuhaltende Zeitraum vorgegeben sind. Die Funktion $p(\cdot)$ wird Zielfunktion genannt und beschreibt differentielle Größen wie den aktuellen Kraftstoffverbrauch, den Verschleiß oder die zurückgelegte Strecke, welche über die Zeit integriert werden. Bei der Minimierung der Kostenfunktion muss jedoch die Zustandsgleichung beachtet werden, was über die Kopplung beider Probleme in der Hamilton-Funktion realisiert werden kann:

$$H(x, u, \lambda) = -p(x, u) + \lambda^T(t) \cdot f(x, u). \quad (4.3)$$

Die Verbindung ist dabei durch Einführung der Lagrange-Multiplikatoren λ möglich, welche die Erfüllung der Optimalitätsbedingung durch Linearkombination ermöglichen [GS07].

Die Optimalitätsbedingung ist erfüllt, wenn die Ableitung der Hamilton-Funktion nach den Steuergrößen

$$\frac{\partial H}{\partial u} = -\frac{\partial p(x, u, t)}{\partial u} + \lambda^T(t) \cdot \frac{\partial f(x, u, t)}{\partial u} = 0 \quad (4.4)$$

minimal wird. Die Erfüllung der Zustandsgleichung bei Lösung der Gleichung zeigt sich dabei in:

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda} = \frac{\partial x}{\partial t}. \quad (4.5)$$

Die Kozustandsdifferentialgleichung zur Berechnung der Lagrange-Multiplikatoren wird beschrieben über:

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H(x, u, t)}{\partial x}^T = \frac{\partial p(x, u, t)}{\partial x} - \frac{\partial f(x, u, t)}{\partial x} \cdot \lambda(t) = 0. \quad (4.6)$$

Für die Berechnung von Fahrtrajektorien kann die zeitabhängige Zustandsformulierung auch gegen eine wegabhängige Zustandsformulierung ersetzt werden. Dies erzeugt jedoch kritische Punkte in Standphasen, da dann die Eindeutigkeit der Berechnung der Zustandsgröße Zeit nicht gewährleistet ist.

4.2.2 Optimale Steuerung mit beschränkten Eingängen

In realen technischen Systemen sind die Steuergrößen betragsmäßig beschränkt, da die Wirkung der Aktoren durch bauartspezifische Faktoren, aber auch durch Restriktionen in der Energieversorgung, beschränkt ist. Gleichzeitig kann auch der Zustandsraum durch Nebenbedingungen beschränkt sein. Eine mögliche Formulierung dieser Restriktion stellt:

$$f_1(x, u, t) \leq 0 \quad (4.7)$$

dar.

Einen Lösungsansatz für diese Problemklasse bietet das Pontryagin'sche Maximumprinzip [GS07]. Dies besagt, dass die Hamilton-Funktion über alle Steuergrößen maximiert werden muss:

$$H(x, u, \lambda) = -p(x, u) + \lambda^T(t) \cdot f_2(x, u) \rightarrow \max. \quad (4.8)$$

In dieser Formulierung sind Unstetigkeiten in den Steuergrößen zugelassen. Für einige Probleme können in Abhängigkeit der Lagrange-Multiplikatoren Regeln für die optimale Steuerung gefunden werden. Diese liegen unter Umständen an den Grenzen der Steuergrößen. Das Umschalten zwischen den optimalen Betriebsarten ist derart zu bestimmen, dass die Randbedingungen eingehalten werden. Dafür können teilweise computergestützte Lösungsverfahren gefunden werden.

4.2.3 Computergestützte Lösungsverfahren

Aufgrund der Beschränktheit der analytischen Lösung auf einfache Probleme müssen für die Lösung des Optimierungsproblems computergestützte Lösungsverfahren angewendet werden. Zu

diesen gehören die nichtlineare Programmierung, die dynamische Programmierung nach dem Prinzip von BELLMANN und die evolutionären Algorithmen [FMT02].

Nichtlineare Programmierung

Zu den Methoden gehören gradientenbasierte Ansätze, mit denen beispielsweise die Suche der Umschaltpunkte zwischen Steuerregeln realisiert werden kann. Die Lösung des Problems auf Basis der Gleichungen in 4.2.1 wird in der Literatur als zu aufwändig angesehen, zumal bei komplexen, nichtlinearen Verbrauchsberechnungsgleichungen die Frage nach lokalen Minima nicht beantwortet werden kann. Der Einsatz von neueren nichtlinearen Programmierungsmethoden, wie der sequentiellen quadratischen Programmierung, wurde in der Literatur vorgestellt [FMT02]. Nachteilig ist, dass das Modell differenzierbar sein muss. Weiterhin wird die nicht determinierte Berechnungszeit als ungünstig angesehen.

Dynamische Programmierung

Die dynamische Programmierung ist ein Suchalgorithmus, der für Zustandspunkte der fortschreitenden Variable (Geschwindigkeit, Zeit) die unter einem Kriterium optimale Trajektorie bis zum Ende der Simulation findet. Dabei müssen alle relevanten Zustandsgrößen (Randbedingungen, Nebenbedingungen, Differentialgleichungsnebenbedingungen) abgebildet und diskretisiert werden. Unter der Einschränkung der Wertediskretisierung führt das Verfahren bei determiniertem Rechenaufwand zum optimalen Ergebnis. Die Beschränkung auf einen bestimmten, ggf. nicht vollständigen Satz von Steuerregimen, entfällt. Nachteil ist der exponentielle Anstieg der Rechenzeit mit der Zahl der Zustandsvariablen ([Bac05], S. 21, [Ber09]).

Die Berechnung eines Zustands erfolgt nach der zeit- bzw. wegdiskreten Formulierung:

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k) \text{ mit } k \in [0, N-1] \subset \mathbb{N}. \quad (4.9)$$

Die Diskretisierung bezüglich der (ggf. beschränkten) dynamischen Zustandsgrößen $x_k \in X_k \subset \mathbb{R}^n$ und den beschränkten Steuergrößen $u_k \in U_k \subset \mathbb{R}^m$ erfolgt sowohl in den Variablen (Index k) als auch in den Werten (dafür steht der Index \mathbb{R}^n in den Vektorräumen). Ein Steuerregime soll als $\pi = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_{N-1}\}$ bezeichnet werden. Die diskretisierte Kostenfunktion in Abhängigkeit vom Steuerregime

$$J_\pi(x_0) = g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, \mu_k) \quad (4.10)$$

ergibt sich analog zu Gleichung (4.2). Die optimale Trajektorie in Abhängigkeit vom definierten Endzustand ist nun diejenige, für welche die Kostenfunktion minimal wird:

$$J_{\min}(x_0) = \min_{\pi \in \Pi} J_\pi(x_0). \quad (4.11)$$

Das Bellmannsche Optimalitätsprinzip besagt, dass alle Teilstücke der optimalen Trajektorie wiederum bezüglich des Kostenfunktional optimal sind ([GS07], S. 312). Praktisch erfolgt das Auffinden der Lösung in zwei Schritten. Bei einer Rückwärtsrekursion werden ausgehend von einem Endzu-

stand alle möglichen Zustände des Vorgängerzustands berechnet, welche unter Berücksichtigung der Differentialgleichungsnebenbedingung erreichbar sind. In einem dem vorherigen Schritt zugehörigen Ergebnisvektor werden der Nachfolgezustand und der Wert der Zielfunktion hinterlegt. Existiert bereits ein Eintrag, werden die Werte der Zielfunktion überprüft und der kleinere Wert mit dem dazugehörigen Nachfolgezustand eingetragen. Das Verfahren wird nun bis zum gewünschten Startpunkt (Zustand, Zeit- bzw. Wegschritt) durchgeführt:

$$J_k(x_k) = \min_{u_k \in U_k(x_k)} \{g_k(x_k, u_k) + J_{k+1}[f_k(x_k, u_k)]\}. \quad (4.12)$$

Das eigentliche Auffinden der Steuertrajektorie wird nun über eine Vorwärtsrekursion gelöst. Vom gewünschten vorliegenden Ausgangszustand ausgehend wird jeweils der optimale Nachfolgezustand ermittelt. Aus den Zuständen können die Steuergrößen abgeleitet werden, sofern diese nicht bereits in der Rückwärtsrekursion für die Berechnung der Zielfunktion benötigt und abgespeichert wurden. Das Verfahren ist in Abbildung 4-1 für ein Problem mit einer Zustandsgröße dargestellt. Es ist immer an die jeweilige Problemstellung anzupassen. Die Spezifika werden in den entsprechenden Abschnitten für die Optimierung der Fahrweise (4.3.5) und des Speicherbetriebs (4.4.5) beschrieben.

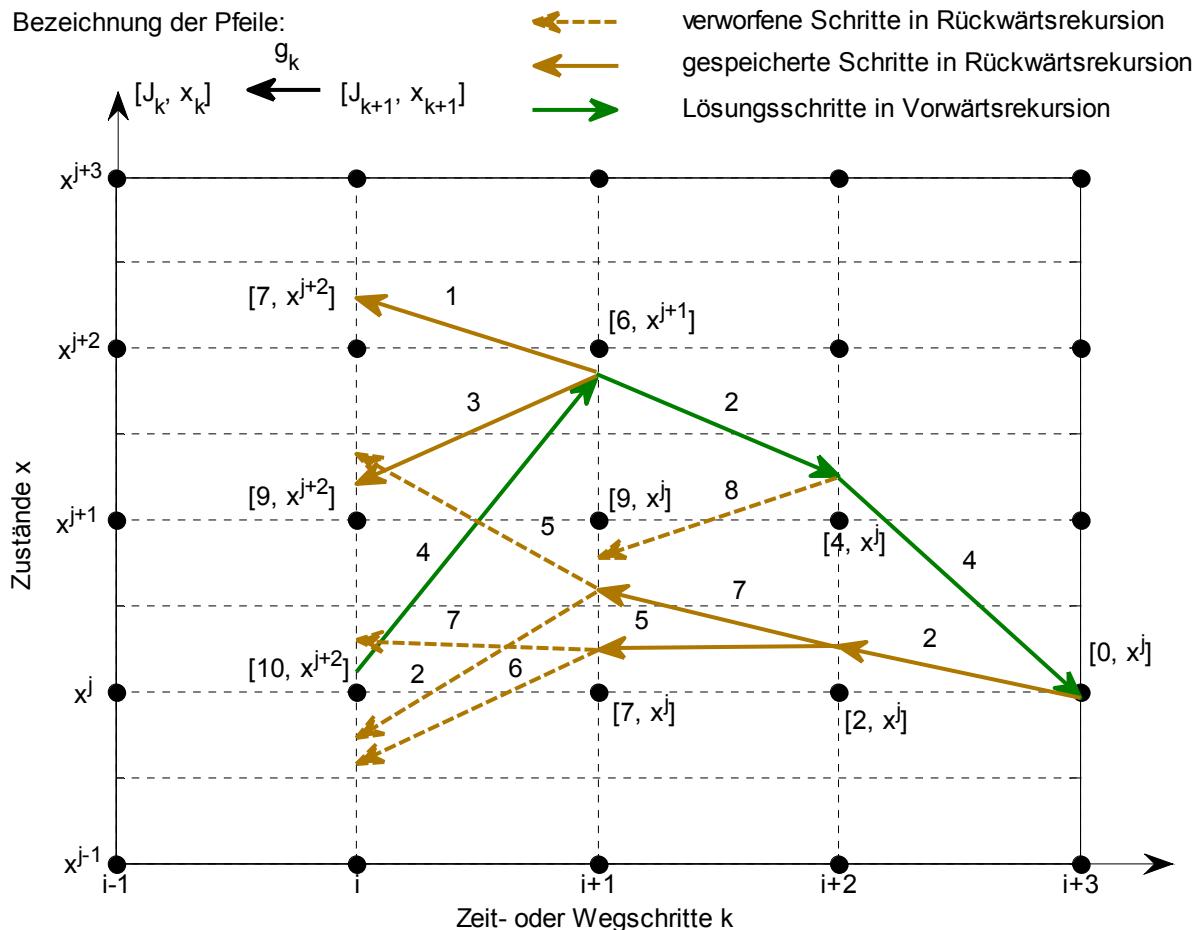


Abbildung 4-1: Beispielhafte Darstellung der Rückwärts- und Vorwärtsrekursion der dynamischen Programmierung (die eingezeichnete Vorwärtsrekursion beginnt in $k=i$ im Zustand x^j)

Evolutionäre Algorithmen

Evolutionäre Algorithmen basieren auf der Anwendung natürlicher Mechanismen der Evolution zur generationenbasierten Annäherung an das Optimum. Vorteilhaft gegenüber Gradientenverfahren ist die Effizienz beim Auffinden von globalen Optima insbesondere bei diskontinuierlichen und nichtlinearen Zielfunktionen. Sie werden z. B. bei der Berechnung optimierter Fahrtrajektorien zum Auffinden der Umschaltpunkte zwischen Fahrregimen und der Konfigurationsoptimierung angewandt. Die Implementierung von evolutionären Algorithmen mit Hilfe der Operatoren Mutation, Rekombination und Selektion ist in Abschnitt 6.4.1. beschrieben.

4.3 Optimierung der Fahrweise

Die Optimierung der Fahrweise von Schienenfahrzeugen ist ein naheliegender und lange gehegter Wunsch. Für eine einfache Betrachtung über die kinetische Energie und quadratische Fahrwiderstandsgleichungen wurden nach Aufkommen der optimalen Steuerung in der Mathematik bereits in den siebziger Jahren analytische Lösungen für optimale Fahrstrategien gefunden [Alb08]. Diese Erkenntnisse bilden die Basis für weitergehende Betrachtungen bezüglich der Erweiterungen bei der Einführung der Rekuperationsfunktion im Fahrzeug über die Möglichkeit der Speisung der Nebenaggregate bzw. der Ladung von Energiespeichern auf dem Fahrzeug. Die Verbesserung der Fahrweise ist im Rahmen dieser Arbeit besonders für die zuverlässige Verbrauchsberechnung und in der Rückwirkung zum Speichereinsatz von Bedeutung. Dafür sollen einige Aspekte bei der Fahrt mit dieselelektrischen Fahrzeugen mit und ohne Energiespeichern näher betrachtet werden. Die Umsetzung der Fahrerassistenzsysteme ist nicht Gegenstand der Arbeit. Dennoch sollen im Folgenden kurz Aspekte der energiesparenden Fahrweise in der Praxis vorgestellt werden, da die Möglichkeit der praktischen Umsetzung auch einen Einfluss auf die Bewertung über verschiedene Verfahren erstellter Fahrtrajektorien hat.

4.3.1 Energiesparende Fahrweise in der Praxis

Die energiesparende Fahrweise ist Teil der Lokführerschulung bei vielen Betreibern. Wenn keine Fahrerassistenzsysteme auf dem Fahrzeug installiert sind, wird die energiesparende Fahrweise über Grundregeln, wie zum Beispiel:

- bevorzugte Nutzung der generativen elektrischen Bremse oder
- Ausrollen auf Halt

gelehrt ([MLMH08], [Leh07]). Hierbei ist der Erfolg vom Können des Fahrers und seiner Streckenkenntnis abhängig. Für den Fahrer bleibt das Risiko einer Verspätung, welche er schwer abschätzen kann und welche schwerer wiegt als eine mögliche Energieeinsparung. Deshalb werden die Potentiale in der Regel nicht vollständig ausgeschöpft.

4.3.2 Fahrerassistenzsysteme

Die zunehmende Verbreitung von Fahrerassistenzsystemen und einige kommerzielle Beispiele wurden bereits in Abschnitt 1.3 erörtert. Es soll nun die Einordnung einer vorausberechneten au-

tomatischen Fahrweise im Kontext des Systems Fahrzeug und Fahrer beschrieben werden, bevor auf die mathematische Lösung des Problems eingegangen wird.

Das Fahrerassistenzsystem stellt die Vorsteuerung im geregelten System dar. Der Fahrer ist gehalten, den Vorgaben des Assistenzsystems zu folgen. Ihm obliegt allerdings die Freiheit und Verantwortung, die Zugkraftanforderung selbstständig zu stellen, da unplanmäßige Störungen im Betrieb auftreten können. Diese sind gegebenenfalls durch das Assistenzsystem nicht abgedeckt. Die Zugkraftanforderung wird im Antriebs- bzw. Bremssystem umgesetzt. Dies führt zu einer Zugkraft am Rad und folgend zur Bewegung des Zugverbands.

Das technische System und die Fahrtbedingungen werden in dem Assistenzsystem modellhaft abgebildet. Bei einer realen Fahrt werden in der Regel immer mehr oder wenige große Abweichungen auftreten. Der Regelkreis wird durch den Fahrer geschlossen (Abbildung 4-2). Zu beachten ist, dass das Assistenzsystem bei Abweichungen von der Bahnplanung in der Lage sein muss, korrigierend einzutreten und die Fahrempfehlung zu ändern. Dies ist noch besser möglich, wenn das auf dem Fahrzeug installierte System Daten von einem übergeordneten Leitrechner bekommt, in dem die Zugbewegungen (z. B. bei Verspätungen) aufeinander abgestimmt werden.

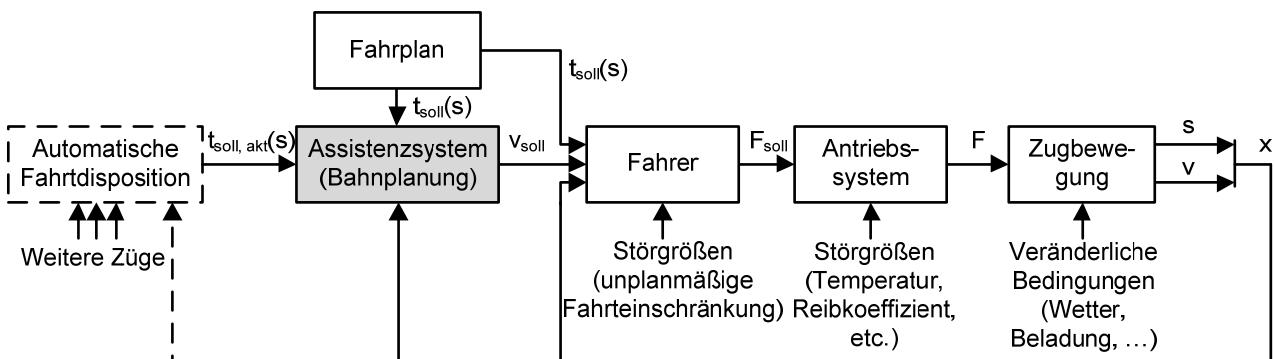


Abbildung 4-2: Darstellung der Wirkungsweise eines Fahrerassistenzsystems inklusive möglicher bei der Prädiktion nicht bekannter Störgrößen

Ein automatischer Zugbetrieb, der in einigen U-Bahnsystemen zum Einsatz kommt, ist bisher in Europa für Vollbahnen auf dem öffentlichen Schienennetz unüblich. Aus Sicht der energiesparenden Fahrweise wäre ein solches System anzustreben, da bei dem Abfahren von Fahrtrajektorien mit häufigen Zugkraftänderungen die Belastung für den Fahrer und die entstehenden Regelfehler groß sind. Vereinfachte Assistenzsysteme, welche nur Umschaltpunkte zwischen klassischen Fahrregimen (z. B. Ausrollen) anzeigen, sind für den Fahrer wesentlich einfacher zu beherrschen. Ein rein automatischer Zugbetrieb ist aufgrund der nicht vollständig überwachbaren Gleis- und Bahnsteigbereiche jedoch kritisch.

4.3.3 Problemformulierung

Die Erstellung der optimalen Fahrtrajektorie ist einer Reihe von Restriktionen unterworfen, die in Rand- und Nebenbedingungen zu unterteilen sind. Es sind weiterhin die Gleichungen die Fahrodynamik und die Verbrauchsberechnung zu berücksichtigen.

Eingangsparameter

Der zur Aufstellung des Optimierungsproblems notwendige Datensatz setzt sich zusammen aus:

- der Zugkonfiguration bestehend aus Lokomotive und Wagenzug mit den dazugehörigen Massen- und Widerstandsparametern,
- dem für die Strecke anzunehmenden maximalen Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Schiene,
- der Fahraufgabe in Form der Strecke mit den Haltepunkten, charakterisiert durch Streckenkilometer und Haltezeit, die zulässigen Streckengeschwindigkeiten und die für die Streckenwiderstandsberechnung charakteristischen Größen (Bogenwiderstand, Neigung),
- dem für die Fahrt zugrundeliegenden Leistungsbedarf der Zugenergieversorgung,
- dem Antriebsstrang der Lok mit allen für die Berechnung der maximalen Zugkraft notwendigen Kenngrößen und der für die Verbrauchsberechnung notwendigen Verlustbeschreibung.

Diese Eingangsinformationen sollen im Folgenden zur Aufstellung des Optimierungsproblems verwendet werden. Es wird von einem Fahrzeug mit kontinuierlich stellbarer Zugkraft ausgegangen, wie dies bei Lokomotiven mit wechselrichtergespeisten Fahrmotoren technisch möglich ist.

Steuergröße

Zunächst sind die Eingriffsmöglichkeiten in das System zu klären. Die Stellmöglichkeiten des Fahrers liegen in der Bedienung des Zugkraft- und Bremshebels. Die daraus resultierenden beiden Eingabegrößen können zu einer zusammengefasst werden, da ein Bremskraftaufbau F_B bei gleichzeitiger Traktionskraft am Rad F_T offensichtlich weder verbrauchs- noch verschleißgünstig ist. Es wird eine Steuergröße $u_1(t)$ eingeführt, welche die Zugkraft am Rad repräsentiert:

$$\begin{aligned} F_T &= \begin{cases} u_1(t) & \text{für } u_1(t) > 0 \\ 0 & \text{für } u_1(t) \leq 0 \end{cases} \\ F_B &= \begin{cases} 0 & \text{für } u_1(t) > 0 \\ u_1(t) & \text{für } u_1(t) \leq 0 \end{cases} \quad \text{mit } u_1(t) < F_{\max}(v, t). \end{aligned} \quad (4.13)$$

Die Bremskraft wird bevorzugt über die rekuperative elektrische Bremse aufgebracht (Bremsbeladung, siehe auch Abschnitt 3.6.5).

Bewegungsgleichung

Grundsätzlich muss jede erstellte Fahrtrajektorie der Bewegungsgleichung des Zuges genügen, die in Gleichung (3.1) eingeführt wurde. Bezieht man die Steuergröße in die Gleichung mit ein, entsteht:

$$a = \frac{F_T(u_1, v, t) - F_B(u_1) - F_{W,St}(s) - F_{W,ZUG}(s, v)}{m_{\text{ges,dyn}}}. \quad (4.14)$$

Darüber hinaus können die Zustandsgrößen Streckenpunkt und Fahrgeschwindigkeit nach Formel (3.2) berechnet werden. Auf Basis dieser Zustandsgrößen sind die Nebenbedingungen definiert.

Nebenbedingungen

Als Nebenbedingungen treten die ortsabhängige Geschwindigkeitsrestriktion

$$v(s) \leq v_{\max}(s), \quad (4.15)$$

die Kraftschlussgrenze

$$F_T \leq F_{RS,\max}, \quad (4.16)$$

und eine primär komfortbedingte Maximalverzögerung

$$a \geq a_{B,\max} \quad (4.17)$$

auf. Die begrenzte Verzögerung ersetzt in diesem Fall die Limitierung der Bremskraft, da die aus Komfortaspekten gewählte Bremsverzögerung mit den auf dem Fahrzeug installierten Bremssystemen auf jeden Fall erreicht wird.

Randbedingungen

Weiterhin müssen die Randbedingungen in Form der Haltepunkte und der Haltezeiten eingehalten werden. Es gelten

$$s(t_{A,i}) = s_{A,i}, \quad s(t_{E,i}) = s_{E,i}, \quad v(t_{A,i}) = 0 \quad \text{und} \quad v(t_{E,i}) = 0 \quad (4.18)$$

für eine Fahrt mit n Streckenabschnitten (Index i) vom Anfangspunkt (Index A) bis Endpunkt (Index E). Die maximale Fahrzeit für die Bewältigung der Gesamtstrecke sei mit

$$t_{\text{ges}} = t_{E,n} - t_{A,1} \leq T_{\max} \quad (4.19)$$

vorgegeben. Diese maximale Fahrzeit ist von der verfügbaren Fahrzeitreserve abhängig. Diese Fahrzeitreserve resultiert aus dem Regelzuschlag, welcher eine relative Erhöhung der Fahrzeit bewirkt. Dies ist notwendig, um die Qualitätsanforderung des verspätungsfreien Betriebs sicherzustellen. Die Regelreserve ist abhängig von Betreiber und Fahrzeuggattung und liegt im Bereich von drei bis sieben Prozent ([Pac04], S. 195).

Ziel- und Kostenfunktion

Bei konventionellen Fahrzeugen bildet der Kraftstoffmassenstrom die alleinige Zielfunktionsgröße. Er kann mit Hilfe der Energiesimulation nach dem in Abschnitt 3.8.4 beschriebenen Verfahren berechnet werden. Dabei werden die Leistungsaufnahme der Hilfs- und Nebenbetriebe und die entsprechende Effizienz der Energiewandlung der Antriebsstrangkomponenten berücksichtigt. Die Kostenfunktion als Integral der Zielfunktion ist damit über

$$m_{Kr,\min} = \min_{u_1(t)} \int_{t_A}^{t_E} \dot{m}_{Kr}(u_1, s, v) dt. \quad (4.20)$$

definiert.

4.3.4 Fahrregime unter Anwendung des Maximumprinzips

Der Fahrstil der schnellsten Fahrt als Grenzfall und Bezugsgröße für die mögliche Energieeinsparung durch intelligente Fahrstrategien wurde in Abschnitt 3.2.5 beschrieben. Im Folgenden werden weitere Fahrstrategien vorgestellt, welche die Fahrstrategie der schnellsten Fahrt erweitern und eine Energie- bzw. Kraftstoffeinsparung bei einer geringfügig längeren Fahrzeit ermöglichen.

Klassische Fahrregime einer energieoptimalen Fahrt

Anhand des Maximumprinzips sollen die Fahrregime begründet werden, aus denen sich die optimale Fahrt zusammensetzt. Für die Betrachtung der mechanischen Antriebsleistung ohne verlustbehafteten Antriebsstrang, ohne Berücksichtigung von Nebenverbrauchern und ohne Rückspeisung in den Fahrdrift oder in einen Speicher wurde dieses Verfahren in [Alb08] dargestellt. Dabei wird von einer konstanten mittleren Steigung im Abschnitt ausgegangen. Als Lösung kristallisieren sich die Fahrregime

- Beschleunigung mit maximaler Zugkraft,
- Geschwindigkeit halten (mit positiver und gegebenenfalls negativer Zugkraft),
- Ausrollen und
- Bremsen

heraus. Diese Betrachtung soll auf eine ideale Rekuperation zur Abdeckung einer Grundleistung erweitert werden.

Das Fahrregime Rekuperation

Als Steuergröße wird eine kontinuierlich einstellbare relative Zugkraft bezogen auf die maximal zulässige Bremskraft ermittelt:

$$u_{\text{mech}} = -\frac{F}{F_{B,zul}}. \quad (4.21)$$

Die relative Zugkraft ist notwendigerweise beschränkt durch:

$$-1 \leq u_{\text{mech}} \leq u_{\text{mech,max}} = -\frac{F_{T,\max}}{F_{B,zul}}. \quad (4.22)$$

Die Differentialgleichungen ergeben sich damit zu:

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= v \text{ und} \\ \frac{dv}{dt} &= |a_B| \cdot u_{\text{mech}} - f_w(v) - i_N \cdot g, \end{aligned} \quad (4.23)$$

wobei a_B die maximale Bremsbeschleunigung und f_w den bezogenen Fahrwiderstand repräsentieren. Die Optimierung soll hinsichtlich der mechanischen Leistung erfolgen. Es wird eine mechani-

sche Grundleistung $P_{\text{Grundlast}}$ angenommen, welche die Nebenaggregate repräsentiert. Damit ergibt sich die Zielfunktion:

$$p(u_{\text{mech}}, v) = \begin{cases} \left(\frac{P_{\text{Grundlast}}}{|a_B| \cdot m_{\text{dyn}} \cdot v} + u_{\text{mech}} \right) \cdot |a_B| \cdot m_{\text{dyn}} \cdot v & \text{für } u_{\text{mech}} \geq \frac{P_{\text{Grundlast}}}{|a_B| \cdot m_{\text{dyn}} \cdot v} \\ 0 & \text{für } u_{\text{mech}} < \frac{P_{\text{Grundlast}}}{|a_B| \cdot m_{\text{dyn}} \cdot v} \end{cases}. \quad (4.24)$$

Nach dem Maximumprinzip soll die Hamilton-Funktion

$$H(u_{\text{mech}}, v, \lambda) = \lambda_1 \cdot v + \lambda_2 \cdot [|a_B| \cdot u_{\text{mech}} - f_w(v) - i_N \cdot g] - p(u_{\text{mech}}, v) \quad (4.25)$$

maximal werden. Daher wird in Fallunterscheidung

$$\begin{aligned} \lambda_2 \cdot u_{\text{mech}} - \left(\frac{P_{\text{Grundlast}}}{|a_B| \cdot m_{\text{dyn}} \cdot v} + u_{\text{mech}} \right) \cdot m_{\text{dyn}} \cdot v &\rightarrow \max \quad \text{für } u_{\text{mech}} \geq \frac{P_{\text{Grundlast}}}{|a_B| \cdot m_{\text{dyn}} \cdot v} \\ \lambda_2 \cdot u_{\text{mech}} &\rightarrow \max \quad \text{für } u_{\text{mech}} < \frac{P_{\text{Grundlast}}}{|a_B| \cdot m_{\text{dyn}} \cdot v} \end{aligned} \quad (4.26)$$

ermittelt.

Es ergeben sich folgende Lösungen für optimale Regime für u_{mech}

$$u_{\text{mech, opt}} = \begin{cases} u_{\text{mech, max}} & \text{für } \lambda_2 > v \cdot m_{\text{dyn}} \quad \text{volle Zugkraft} \\ [u_{\text{rek}}, u_{\text{max}}] & \text{für } \lambda_2 = v \cdot m_{\text{dyn}} \quad \text{Konstantfahrt (Zugkraft positiv)} \\ u_{\text{rek}} & \text{für } 0 < \lambda_2 < v \cdot m_{\text{dyn}} \quad \text{Rekuperation} \\ [-1, u_{\text{rek}}] & \text{für } \lambda_2 = 0 \quad \text{rekuperative Konstantfahrt (Zugkraft negativ)} \\ -1 & \text{für } \lambda_2 < 0 \quad \text{Bremsen mit max. zulässiger Bremskraft} \end{cases} \quad (4.27)$$

mit einer geschwindigkeitsabhängigen rekuperativen Verzögerung von:

$$u_{\text{rek}} = \frac{P_{\text{Grundlast}}}{|a_B| \cdot m_{\text{dyn}} \cdot v}. \quad (4.28)$$

Damit würde sich bei verlustfreier Energierekuperation bei Anwendung der rekuperativen Verzögerung gegenüber dem Fahrregime Rollen eine Einsparung an mechanischer Energie ergeben. Grund dafür ist, dass die Rekuperation eine schnellere Verzögerung als das Ausrollen liefert. In beiden Phasen geht die im Fahrzeug gespeicherte kinetische und potentielle Energie nicht verloren, sondern wird zur Überwindung der Fahrwiderstände eingesetzt. Bei der entstehenden größeren Verzögerung ist es möglich, ohne Fahrzeitverlust einen größeren Teil der mechanischen Energie zu nutzen, da die Restgeschwindigkeit vor Einleitung der Betriebsbremsung geringer ist (Abbildung 4-3). Ob sich eine Einsparung in jedem Fall auch für eine verlustbehaftete Rekuperation in einen Speicher mit entsprechendem Wirkungsgrad für Laden und Entladen gilt, muss für die jeweilige Fahrzeugkonfiguration über die Simulation beantwortet werden. Für die beschriebene Fahrzeugkonfiguration wurden fünf reale Strecken mit kombinierten Regimen aus „Ausrollen“ und „Redu-

zierung der Maximalgeschwindigkeit“ bzw. „rekuperative Verzögerung“ und „Reduzierung der Maximalgeschwindigkeit“ analysiert. Der Verbrauchsvorteil der energiesparenden Fahrweise unter Einsatz des Fahrregimes „rekuperative Verzögerung“ gegenüber dem klassischen „Ausrollen“ betrug im Mittel 1,3 Prozent [Sch11a].

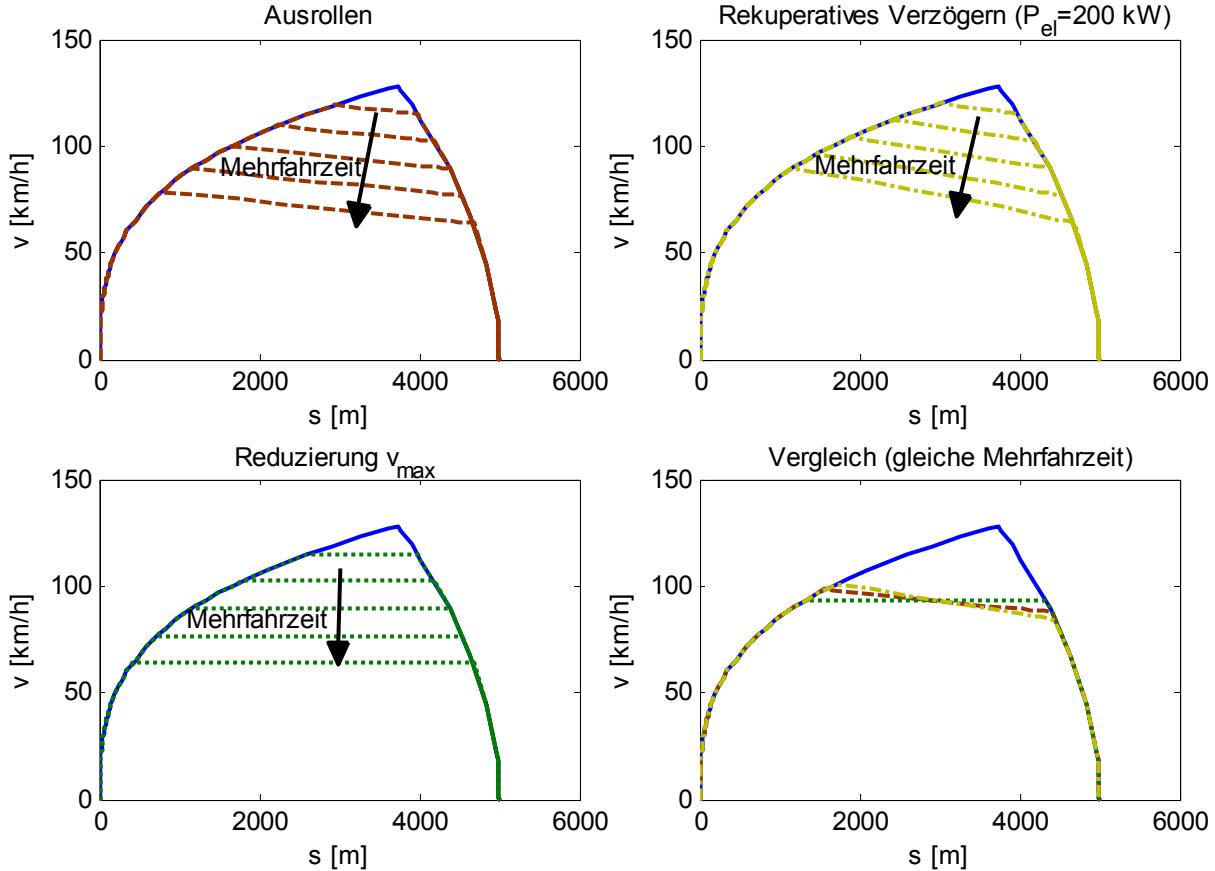


Abbildung 4-3: Rekuperatives Verzögern im Vergleich mit klassischen Fahrregimen für dieselbetriebene Fahrzeuge

Weitere Fahrregime

In der Literatur werden zusätzliche Fahrregime besprochen, welche bei komplexeren Rand- und Nebenbedingungen Anwendung finden sollen. Ein Beispiel ist das Auftreten eines starken Gefälles [Lin04]. Bei einer Steigung mit anschließendem Gefälle wird die „Bergfahrt mit Schwung“ vorgeschlagen. Dabei wird vor der Bergkuppe die Zugkraft abgeschaltet. Nach Überfahren der Bergkuppe rekuperiert das Fahrzeug die potentielle Energie und nutzt diese zur Beschleunigung auf Streckengeschwindigkeit. Bei Abschnitten mit konstantem Gefälle kann ein ähnliches Verfahren für die Restbeschleunigung auf Streckengeschwindigkeit genutzt werden („Restbeschleunigung durch Schwerkraft“). Es soll darauf hingewiesen werden, dass eine Möglichkeit zur Erstellung einer Fahrtrajektorie mit starken Gefällewechseln für eine vereinfachte Betrachtung auf Basis der mechanischen Energie in [Khm00] vorgestellt wird. In dem für diese Arbeit entwickelten Programm werden diese Fahrregime nicht implementiert, da ein Fahrzeug mit Energiespeicher besser als ein herkömmliches Fahrzeug in der Lage ist, die Energie beim Halten der Geschwindigkeit in starkem

Gefälle aufzunehmen. Hinzu kommt, dass das Fahrregime Ausrollen häufig diesen Nutzungsfall abdecken kann.

Ein weiterer Diskussionspunkt ist die Frage, ob unter Berücksichtigung der Wirkungsgradketten die Beschleunigung mit reduzierter Zugkraft gegenüber der Beschleunigung mit maximal möglicher Zugkraft überlegen ist. Für die vorliegende Fahrzeugkonfiguration konnte diese Fragestellung über Parameterstudien zugunsten der Beschleunigung mit maximal möglicher Zugkraft beantwortet werden (siehe [Asc10], S. 85, [Wit11], S. 75).

Implementierung der Fahrregime

Basis für die Umsetzung der energiesparenden Fahrweise bildet die schnellste Fahrt, deren Generierung in Abschnitt 3.8.3 beschrieben wird. Aufgrund der Restriktionen im Antriebsstrang, beim Bremsen und den Geschwindigkeitsrestriktionen kann es keine Fahrweise geben, die eine geringere Fahrzeit oder an einem bestimmten Wegpunkt eine höhere Geschwindigkeit aufweist. Die den zusätzlichen Fahrregimen entsprechenden Regeln in Form von Differentialgleichungen sind in Abschnitt 3.8.3 aufgeführt. Für die Lösung der Differentialgleichungen wird der Solver `ode45`⁴⁵ verwendet. Bei Unstetigkeiten im Fahrtverlauf wegen wechselnder Neigungen oder Bogenwiderstände erfolgt durch das Programm ein Neustart des Solvers, wodurch Integrationsfehler vermieden werden und ein zeitaufwändiges Herantasten an die Unstetigkeitsstelle vermieden wird.

Die Umschaltzeitpunkte, ab denen diese Regeln die alte Fahrtrajektorie ablösen, müssen auf eine geeignete Art und Weise beschrieben werden. Jeder Fahrtabschnitt wird in Verzögerungsvorgänge unterteilt, die durch einen Geschwindigkeitsabfall gekennzeichnet sind. Jeder Verzögerungsvorgang bekommt drei Parameter zugeordnet, welche:

- die Maximalgeschwindigkeit im Verzögerungsabschnitt,
- die Übergangsgeschwindigkeit zwischen Rekuperation und reinem Ausrollen und
- die Übergangsgeschwindigkeit zwischen reinem Ausrollen und Bremsen

beschreiben (Abbildung 4-4). Die Definition der Parameter erfolgt normiert auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit im Verzögerungsabschnitt.

Die Anwendung der Parameter beginnt von der Seite des Endpunktes des Fahrabschnitts. Die Berechnung der Fahrregime erfolgt ausgehend von dem Zeitpunkt, an dem die definierte Übergangsgeschwindigkeit auftritt. Dabei werden die Differentialgleichungen der Verzögerung durch Rückwärtintegration gelöst, was die Einhaltung des exakten Wegpunktes des Bahnhofshalts ermöglicht. Die einzelnen Fahrregime werden in der Reihenfolge:

- Rekuperation (p_{rek}),
- Ausrollen (p_{ausr}) und

⁴⁵ In MATLAB implementierter Löser für Systeme gewöhnliche Differentialgleichungen mit variabler Schrittweite auf Basis der Runge-Kutta-Verfahren vierter und fünfter Ordnung [MAT11b].

- Reduktion der Maximalgeschwindigkeit (p_{vmax})
- gestellt.

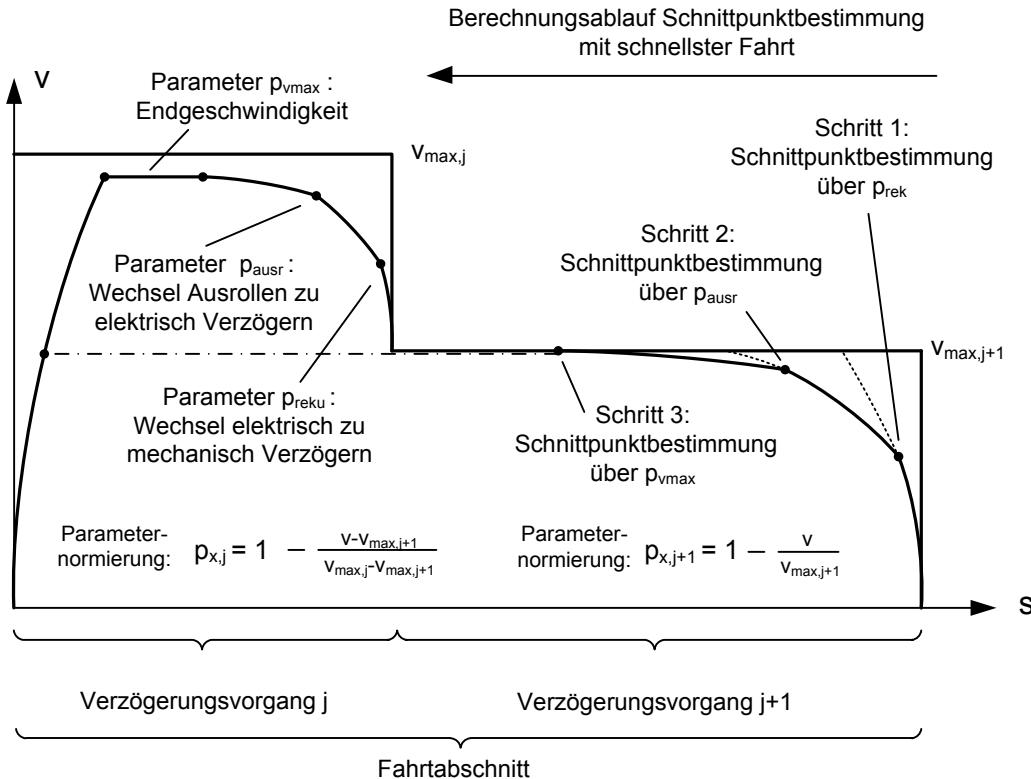


Abbildung 4-4: Parameter zur Beschreibung des Fahrverlaufs (nach [Zim11])

Auffinden der Umschaltzeitpunkte

Mit Hilfe des Maximumprinzips konnte ein Satz von energetisch günstigen Fahrweisen aufgezeigt werden. Die Analyse liefert jedoch keine Erkenntnis darüber, in welcher Weise diese Fahrregime angewandt werden müssen, um eine bestimmte Fahrzeit zu erreichen und gleichzeitig verbrauchs optimal zu fahren. Zur Ermittlung der Lösungen können Gradientensuchverfahren eingesetzt werden. Die Anwendung solcher Verfahren zum Auffinden globaler Minima stellt die Bedingung, dass die Zielfunktion für den zulässigen Parameterraum nur ein Optimum besitzt. Dies ist nicht allgemeingültig zu beweisen. Unter der Annahme von weitgehend stetigem Wirkungsgradverhalten der Antriebsstrangkomponenten bei Dominanz des quadratischen Geschwindigkeitsterms in der Fahrwiderstandsgleichung gegenüber der Wirkungsgradänderung ist diese Annahme jedoch nachvollziehbar.

Für die Verwendung von Gradientenverfahren ist das mögliche Auftreten von numerischen Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Fahrtrajektorien und der anschließenden Verbrauchsrechnung problematisch. Dies kann zur Ermittlung von lokalen Minima führen. Weiterhin sind die hohen Rechenzeiten bis zur Konvergenz der bei langen Strecken entstehenden großen Parametersätze kritisch. Diese Probleme machen die Anwendung des Suchverfahrens sukzessive Approximation attraktiv. Durch Vorgabe der gewollten Mehrfahrzeit pro Iterationsschritt ist das Verfahren robust.

ter gegen daraus resultierende stark bereichsbegrenzte Minima. Außerdem entfällt bei der sukzessiven Approximation die Einführung einer Straffunktion für nicht zulässige Fahrzeiten, weil die Mehrfahrzeit schrittweise bis zum Grenzwert vergeben wird. Der Ablauf dieses Verfahrens ist in Abbildung 4-5 dargestellt.

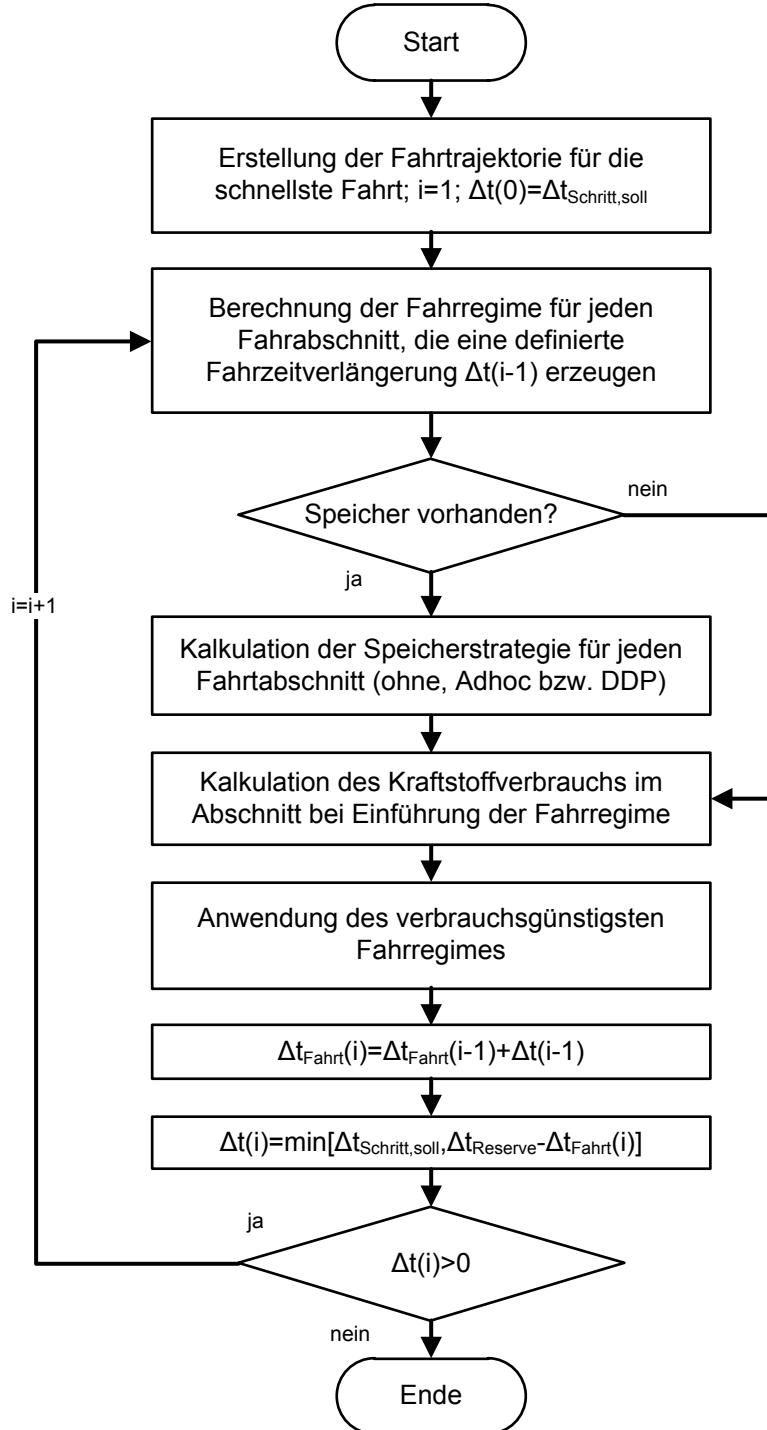


Abbildung 4-5: Schematischer Ablauf der sukzessiven Approximation

Die sukzessive Approximation basiert auf der separaten Berechnung der Verbrauchseinsparung für eine definierte Fahrzeitverlängerung $\Delta t_{Schritt,soll}$ für jedes Fahrregime. In manchen Fällen wird es aufgrund der Parametrisierung vorkommen, dass eine solche Mehrfahrzeit bei Anwendung des

Fahrregimes nicht erreicht werden kann. Dann wird die maximal mögliche Schrittweite unter Einhaltung der Maximalschrittweite gesucht:

$$\Delta t_{\text{Schritt},i} = \max_{\substack{p \in p_{\text{zul}} \\ \Delta t < \Delta t_{\text{Schritt,soll}}}} \Delta t. \quad (4.29)$$

Kann das Fahrregime nur unter Überschreitung der Sollschriftweite angewendet werden, wird von diesem Fahrregime abgesehen. Im Weiteren wird nun die Kraftstoffeinsparung bei Anwendung des Fahrregimes überprüft. Für jedes Fahrregime entsteht ein Gradient der Verbrauchseinsparung pro Mehrfahrzeit:

$$\Delta \text{Verbrauch}_{\text{Kr},i} = \frac{\Delta m_{\text{Kr},i}}{\Delta t_{\text{Schritt},i}}. \quad (4.30)$$

Das verbrauchsgünstigste Fahrregime wird angewandt und die Iterationsschleife beginnt von neuem, bis die Fahrzeitreserve erreicht wird. Vorteil des Verfahrens ist, dass die Neuberechnung des Verbrauchsgradienten immer nur in dem Abschnitt durchgeführt werden muss, in welchem eine Änderung vorliegt. Eine Strecke mit einer großen Anzahl von Neigungen und Bogenradien erhöht zwangsweise die Integrationszeiten der Solver für die Trajektorienberechnung. Aufgrund der geringen Gleichungskomplexität führt das Verfahren jedoch immer noch in einer kurzen Zeit zum Ergebnis.

Ebenso können auch globale Optimierungsverfahren wie evolutionäre Algorithmen angewendet werden. Ein solches Verfahren wird in [AS07] vorgestellt. Die Rechenzeiten bei freien Startwerten waren bei dieser Untersuchung jedoch so hoch, dass für die spezifische Strecke neuronale Netzwerke trainiert wurden, um voroptimierte Startwerte für die Genetischen Algorithmen zu liefern. Die genetischen Algorithmen wurden in einer Diplomarbeit verwendet, um die Güte der sukzessiven Approximation nachzuweisen. Dabei konnten keine relevanten Genauigkeitsvorteile erzielt werden [Zim11]. Bei der Optimierung von Strecken mit vielen Haltepunkten und unter Umständen oft wechselnden Geschwindigkeitsrestriktionen wird die Leistung der genetischen Algorithmen immer schlechter, da die Parameteranzahl steigt und bei jedem Funktionsaufruf die komplette Strecke berechnet werden muss [Asc10]. Die sukzessive Approximation wird deshalb in den folgenden Betrachtungen zum Auffinden der optimalen Übergangsparameter für die trajektorienbasierte energiesparende Fahrweise genutzt.

4.3.5 Dynamische Programmierung

In [FMT02] werden mit der dynamischen Programmierung nach BELLMANN und der sequentiellen quadratischen Programmierung als Vertreter der nichtlinearen Lösungsverfahren zwei verschiedene numerische Berechnungsverfahren verglichen. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass beide Verfahren eine ähnliche Ergebnisqualität aufweisen. Die Lösung über die dynamische Programmierung (DP) zeigt jedoch einige Vorteile, welche die Fahrtberechnung über die DP für die Umsetzung in einem Zugrechner als vorteilhafter gegenüber der sequentiellen quadratischen Programmierung darstellt. So wird kein differenzierbares Modell benötigt und aus der Lösung der Rückwärtsre-

kursion können über die wesentlich schnellere Vorwärtsrekursion auch optimale Lösungen gefunden werden, wenn in der Fahrt Abweichungen von der optimalen Fahrtrajektorie auftreten. In dieser Arbeit wurde deshalb ein DP-Algorithmus umgesetzt, um der trajektorienbasierten Programmierung eine andere Methode zur Seite zu stellen, welche beliebig komplexe Streckenprofile optimieren kann. Damit kann die Güte der aufgestellten trajektorienbasierten Methode für bestimmte Streckenklassen geprüft werden.

Implementierung des Verfahrens

Die dynamische Programmierung für die optimale Fahrt kann als Zeitschrittverfahren (vergl. [ER06]) bzw. als Wegschrittverfahren (vergl. [FMT02]) abgebildet werden. Als laufende Größe wird in der folgenden Implementierung der Weg als Variable gewählt, da über diesen Ansatz die Haltepunkte als Randbedingung exakt eingehalten und die schnellste Fahrt als Referenz für die Geschwindigkeitsbegrenzung genutzt werden kann. Nachteilig ist, dass für die Darstellung des Systemverhaltens in Haltephasen nachträgliche Anpassungen vorgenommen werden müssen. Abgesehen von der Berücksichtigung mehrerer Energiequellen (z. B. bei Einsatz eines Energiespeichers oder dem Mehrmaschinenkonzept) ist die Phase des Bahnhofhalts jedoch für die Fahroptimierung uninteressant.

Die Zustandsgrößen sind somit die Geschwindigkeit und die Zeit. Die Zustandsgröße Zeit muss eingeführt werden, weil sonst die Bestimmung der optimalen Fahrt bei Vorgabe einer bestimmten Mehrfahrzeit nicht möglich ist. Eine Berechnung ohne Berücksichtigung der Fahrzeit würde zwar zur absolut verbrauchsgünstigsten Fahrweise führen. Diese weist jedoch für typische Strecken über zehn Prozent Mehrfahrzeit gegenüber der schnellsten Fahrt auf. Das entstehende Ergebnis ist daher von geringem praktischen Nutzen. Über die Zusammenfassung von Fahrzeit und Kraftstoffverbrauch in einer gewichteten Zielgröße kann eine zulässige Mehrfahrzeit eingehalten werden. Da der Quotient von Kraftstoffverbrauch und Fahrzeit auf den Fahrtabschnitten von Halt zu Halt jedoch nicht konstant ist, würde dies das BELLMANN'sche Optimalitätsprinzip verletzen. Es besagt, dass Teiltrajektorien der Gesamttrajektorie auch für den Abschnitt optimal sein müssen. Das entstehende Ergebnis wäre damit in jedem Fall suboptimal.

Mit der notwendigen Einführung der Zeit als weitere Zustandsgröße entsteht ein zweidimensionaler Zustandsraum. Die optimierte Trajektorie π_{Fahrt} soll

$$m_{Kr,\min}(x_0) = \min_{\pi_{\text{Fahrt}} \in \Pi} m_{Kr,\pi}(x_0) \quad (4.31)$$

genügen und wird über die Rückwärtsrekursion

$$\begin{aligned} m_{Kr,k}(\underline{x}_k) &= \min_{F_i \subset F_{\text{zul}}} \left\{ m_{Kr,k+1}(\underline{x}_{k+1}) + \Delta m_{Kr,i}(\underline{x}_k, \underline{x}_{k+1}) \right\} \\ \text{mit } x &= [v \ t] \\ \text{unter den Nebenbedingungen } P_{\text{el},i} &\subset P_{\text{el,zul}} \text{ und } v_i \subset v_{\text{zul},k} \end{aligned} \quad (4.32)$$

ermittelt.

Die Abbildung der Fahrdynamik erfolgt über ein HEUN-Verfahren⁴⁶:

$$v_{k+1} = \sqrt{v_k^2 + 2 \cdot \frac{F_k - \frac{F_{w,k}(v_k, s_k) + F_{w,k+1}(v_k, s_k, s_{k+1})}{2}}{m_{\text{dyn}}} \cdot (s_{k+1} - s_k)}. \quad (4.33)$$

Für die Ermittlung der optimalen Fahrtrajektorie spielt es keine Rolle, ob man das Verfahren klassisch wie beschrieben oder als Vorwärtsrekursion mit anschließender Rückwärtsrekursion implementiert. Bei Einsatz in einem Fahrtrechner bietet sich jedoch die Variante Rückwärtsrekursion mit anschließender Vorwärtsrekursion an, weil dabei bei Speicherung des Ergebnisses der Rückwärtsrekursion die optimale Fahrt auch bei Abweichungen von der Solltrajektorie allein durch Durchführung der Vorwärtsrekursion mit erheblich geringerem Berechnungsaufwand gelöst werden kann.

Der größte Nachteil des Optimierungsverfahrens liegt im relativ hohen Rechenaufwand. Dieser ist zwar wesentlich geringer als für die erschöpfende Suche⁴⁷ sämtlicher möglicher diskreter Trajektorien. Dennoch ergibt sich für eine Strecke von fünf Kilometern Länge bei einer zulässigen Fahrtzeit von 300 Sekunden, einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h und einer Diskretisierung von

$$\Delta s_{\text{DP}} = 100 \text{ m}, \Delta v_{\text{DP}} = 0,5 \text{ km/h} \text{ und } \Delta t_{\text{DP}} = 1 \text{ s} \quad (4.34)$$

eine Schrittzahl von:

$$\begin{aligned} q_s &= s / \Delta s_{\text{DP}} = 50, \\ q_v &= v_{\max} / \Delta v_{\text{DP}} = 320 \text{ und} \\ q_t &= t_{\text{Strecke,zul}} / \Delta t_{\text{DP}} = 300. \end{aligned} \quad (4.35)$$

Bei Annahme einer möglichen Schrittweite von acht Geschwindigkeitsschritten⁴⁸ pro Gitterpunkt (Steuervariable q_u) müssen

$$q_{\text{ges}} = q_s \cdot q_v \cdot q_t \cdot q_u = 38,4 \cdot 10^6 \quad (4.36)$$

Berechnungsschritte ausgeführt werden.⁴⁹ Die Betrachtung ist eine Grenzwertbetrachtung, weil bei Vorgabe eines Startwerts und Einhaltung der Nebenbedingungen nicht alle Zustände erreicht werden. Das Beispiel zeigt dennoch eindrucksvoll das Problem des „Fluchs der Dimension“ bei diesem Verfahren. Die Komplexität steigt exponentiell mit der Anzahl der Zustandsgrößen. Der Rechenaufwand kann jedoch bei Einschränkung des Zustandsraums erheblich reduziert werden, welche bezüglich Geschwindigkeit und der Fahrzeit durchgeführt werden kann. Weiterhin kann durch eine angepasste Schrittweitensteuerung die Ergebnisqualität erhöht werden. Die Verfahren sollen

⁴⁶ Das Verfahren von HEUN stellt ein explizites Runge-Kutta-Verfahren zweiter Ordnung dar.

⁴⁷ auch unter dem Namen Brute-Force-Methode bekannt

⁴⁸ Annahme: Beschleunigung von +/- 0,5 m/s² und mittlere Geschwindigkeit von 80 km/h.

⁴⁹ Bei einer Berechnungsdauer von 3,7 ms pro Schritt ergibt sich eine Rechenzeit von 39 h. Die Rechenzeit ist abhängig von der Implementierung, der Programmkomplexität, der Codeeffizienz und der Rechenleistung.

im Folgenden vorgestellt werden. Die Reduzierung der Rechenzeit durch eine Vereinfachung des Modells, die Abtastung vorberechneter Kennfelder bzw. eine Optimierung des Programmcodes sind möglich, sollen jedoch hier nicht im Fokus stehen.

Einschränkung des Zustandsraums

Die Vordefinition des gewünschten Suchraums ist für die Geschwindigkeit des Programms von Vorteil, da die Vergrößerung von Vektoren und Strukturen in iterativen Schritten deutlich mehr Rechenzeit als ein Zugriff auf vordefinierte Elemente benötigt. Weiterhin kann so die Einhaltung von Randbedingungen gewährleistet bzw. die Berechnung der Zielfunktion für nicht verwertbare Zustandskombinationen verhindert werden. Bezuglich der Zustandsgröße Geschwindigkeit v ist die schnellste Fahrt die limitierende Begrenzung:

$$v_k \leq v_{\text{schnellste}}(s_k). \quad (4.37)$$

Weiterhin können bei Vorgabe einer bestimmten Mehrfahrzeit die zulässigen Zeitbereiche über

$$t_k < t_{\text{schnellste}}(s_k) + t_{\text{zul}} - t_{\text{schnellste}} \quad (4.38)$$

eingeschränkt werden. Damit wird die Berechnung extrem langsamer Fahrten vermieden. Zusätzlich reduziert die Forderung einer relativen Mindestgeschwindigkeit $c_{v,\text{rel}}$ in Bezug zur schnellsten Fahrt oder einer bereits berechneten optimierten Fahrt (z. B. aus der Trajektorienoptimierung) die Anzahl nicht zielführender Berechnungsschritte:

$$v_k \geq c_{v,\text{rel}} \cdot v(s_k). \quad (4.39)$$

Diese Art der Implementierung hat außerdem den Vorteil, dass die Geschwindigkeitsreserve zwischen zwei Halten nicht zu schnell aufgebraucht und somit möglichst lange ein Puffer für die Fahrzeit aufrecht erhalten werden kann. Mögliche negative Konsequenzen der Einschränkung auf das Optimierungsergebnis werden dadurch erkannt, dass optimierte Trajektorien an den Bereichsgrenzen verlaufen.

Schrittweitenanpassung

Weiterhin ist es sinnvoll, eine Schrittweitenanpassung der Wegschritte durchzuführen. Dies erfolgt unter der Maßgabe, dass die Anzahl der Variationen in $v(s_k)$ und $t(s_k)$ möglichst konstant bleiben soll. Mit steigender Geschwindigkeit nimmt die mögliche Geschwindigkeitsänderung bei einem bestimmten Wegschritt und ebenfalls die dabei entstehende Variation der Fahrzeit ab. Eine Möglichkeit des Gegensteuerns ist die Schrittweitenanpassung auf Basis einer reziproken Verteilung. Das kumulierte Reziproke $R_n(n)$ bei einer minimalen Schrittweite von $s_{\text{Schritt,min}}$ wird definiert über:

$$R_n(n) = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\max[v(s_k), v_{\text{Verteilung}}]} \quad \text{für } n = \{1..N\} \subset \mathbb{N} \quad (4.40)$$

mit $N = \frac{s}{s_{\text{Schritt,min}}}$

Eine diskrete kumulative Verteilungsfunktion $F(n)$ ergibt sich über die Normierung:

$$F(n) = \frac{R(n)}{R(N)} \quad \text{für } n = \{1..N\} \subset \mathbb{N}. \quad (4.41)$$

Die nach der Häufigkeitsfunktion entstehende Wegpunktverteilung $s_{k,\text{var}}$ für eine gewünschte Schrittzahl N_{gew} berechnet sich nach

$$\begin{aligned} i_{k,\text{var}} &= \arg \min_n [F(n) \cdot N_{\text{gew}} > k] \\ s_{k,\text{var}} &= s_k(i_{k,\text{var}}), \end{aligned} \quad (4.42)$$

wobei die entstehende Wegschrittzahl bei Unterschreitung der Mindestwegschrittweite kleiner als die gewünschte Schrittzahl werden kann. Das Prinzip wird in Abbildung 4-6 erläutert.

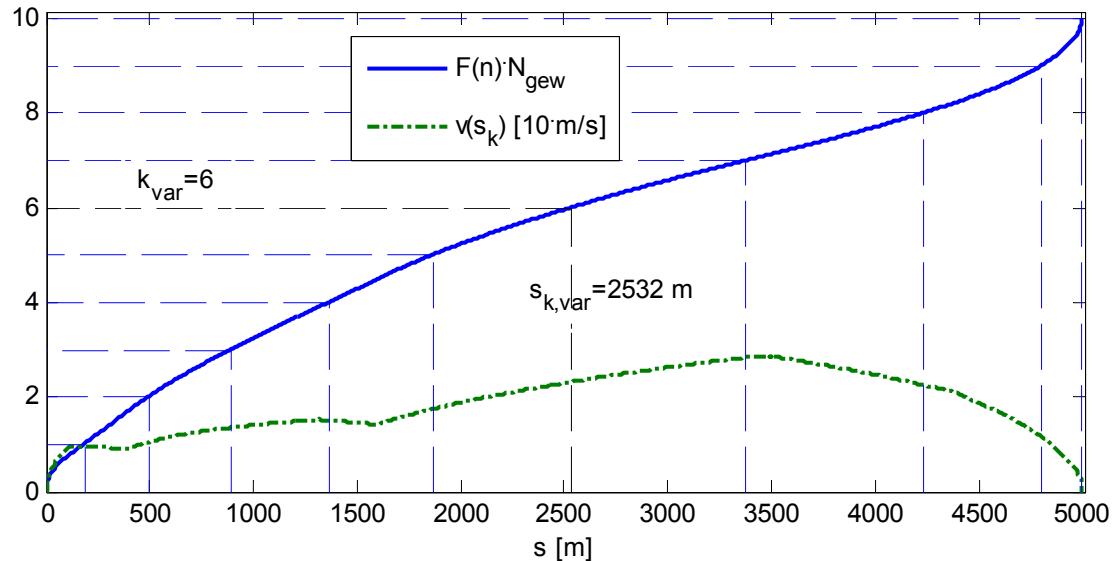


Abbildung 4-6: Prinzip der Wegschrittanpassung

Die entstehenden Gitterpunkte bilden einen Korridor durch den dreidimensionalen Bereich (Abbildung 4-7). Im Beispiel reduziert sich die Anzahl der möglichen Punkte auf 5,2 Prozent der ursprünglichen Größe.⁵⁰

⁵⁰ dies entspricht nun 252.876 Punkten

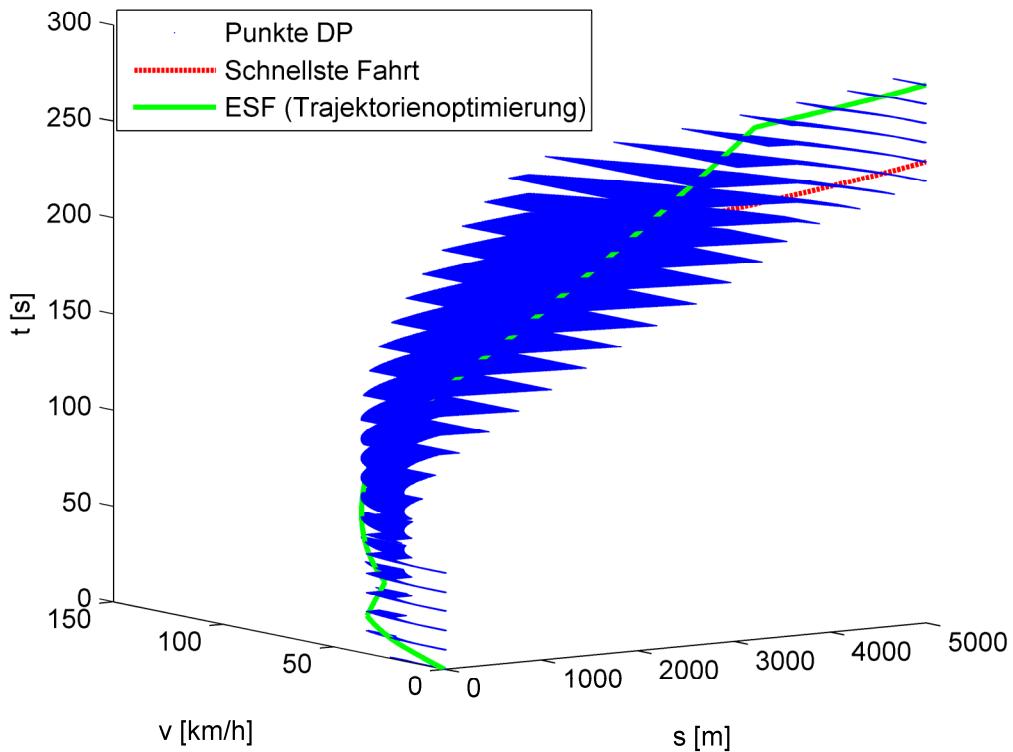


Abbildung 4-7: Eingeschränktes Gitter für die Optimierung über die DP

Abhängigkeit des Ergebnisses von der Fahrzeit

Das Ergebnis einer Fahrt kann nun in Abhängigkeit von der gewünschten Endfahrzeit dargestellt werden (Abbildung 4-8). Dabei zeigt sich, dass sich bei einer Fahrt auf flacher Strecke ohne Kurven die DP zu einem ähnlichen Fahrtverlauf wie die Trajektorienoptimierung mit Hilfe der sukzessiven Approximation führt. Bei Analyse des sich ergebenden resultierenden Lastverlaufs am Generator wird das noch deutlicher (Abbildung 4-9). Es ist zu erkennen, dass mit Hilfe der Rekuperation der vorherrschende Bedarf von Zugenergieversorgung und Hilfsbetriebeumrichter kompensiert wird. Gegen Ende dieser Phase wird der Bremsvorgang eingeleitet. Dies bringt den Nachweis, dass das Fahrregime „rekuperatives Verzögern“ zweckmäßig gewählt wurde und für flache Strecken zu guten Ergebnissen führt.

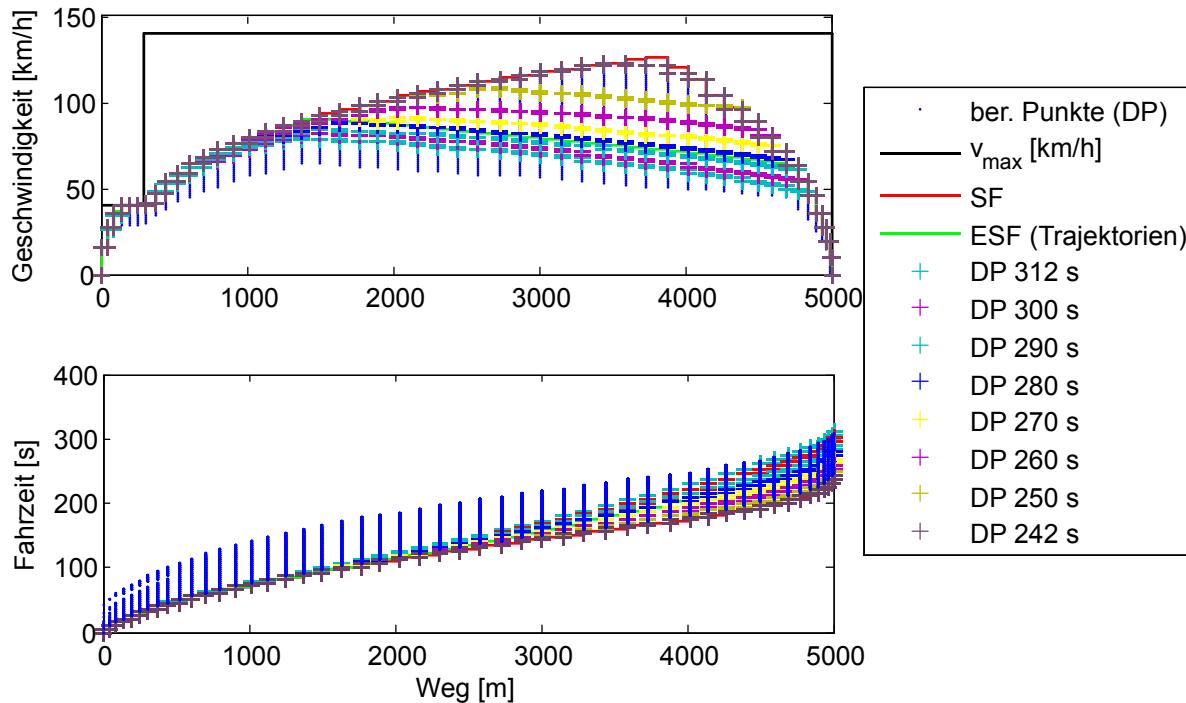


Abbildung 4-8: DP-Optimierungsergebnis (flache Strecke)

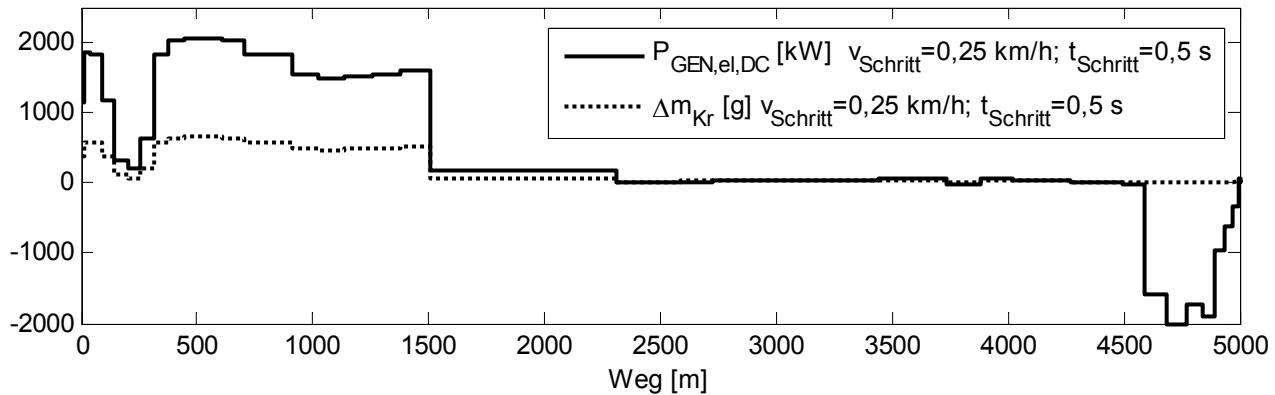


Abbildung 4-9: Leistungsverlauf und Kraftstoffverbrauch pro Wegschritt (Fahrzeit 280 s)

Abhängigkeit des Ergebnisses von der Schrittweite

In Abhängigkeit der Schrittweite der Diskretisierung kann sich das Ergebnis der Fahrtoptimierung verändern. Der Vergleich dreier Schrittweitenkonfigurationen soll das Potential der Verringerung der Schrittweite zeigen. Dabei werden jeweils die Zeit- und die Geschwindigkeitsschrittweite halbiert. Es muss dabei beachtet werden, dass sich der Rechenaufwand bei der gewählten Abstufung der Diskretisierung pro Schritt ungefähr verzehnfacht. Die zu Grunde liegende Relation zwischen Geschwindigkeits- und Zeitschrittweite wurde durch einen Versuch bei konstanter Wegschrittweite gewählt (siehe Anhang: Abbildung C-3). Gleichzeitig wird das Ergebnis der Rückwärtsrekursion, aus der sich über Vorwärtsrekursion die optimalen Trajektorien für veränderte Startpunkte ableiten lassen, jeweils um Faktor vier größer. Die Wegschrittweite wird konstant gehalten, um eine hohe Anzahl von möglichen Geschwindigkeitssprüngen zu garantieren. Eine Verkleinerung der Weg-

schrittweite ohne Verringerung der Geschwindigkeits- bzw. Zeitschritte ist nicht sinnvoll (siehe Anhang: Abbildung C-4). Dies liegt daran, dass die Zahl der möglichen Geschwindigkeitssprünge pro Wegpunkt eingeschränkt wird. Damit kann es vorkommen, dass z. B. eine Verzögerung oder Beschleunigung einer bestimmten Größe nicht mehr möglich wird. Die sich ergebenden Fahrtrajektorien sind in Abbildung 4-10 dargestellt. Die Abweichungen zwischen der DP und der Trajektorienoptimierung sind minimal. Der korrespondierende Leistungsbedarf ist im Anhang in Abbildung C-5 dargestellt. Die Verbesserung bei Betrachtung der sich ergebenden Kraftstoffverbräuche kann in Abbildung 4-11 nachvollzogen werden. Die Verbrauchsdifferenzen im Vergleich zur sukzessiven Approximation und zwischen den verschiedenen Diskretisierungsstufen sind gering.

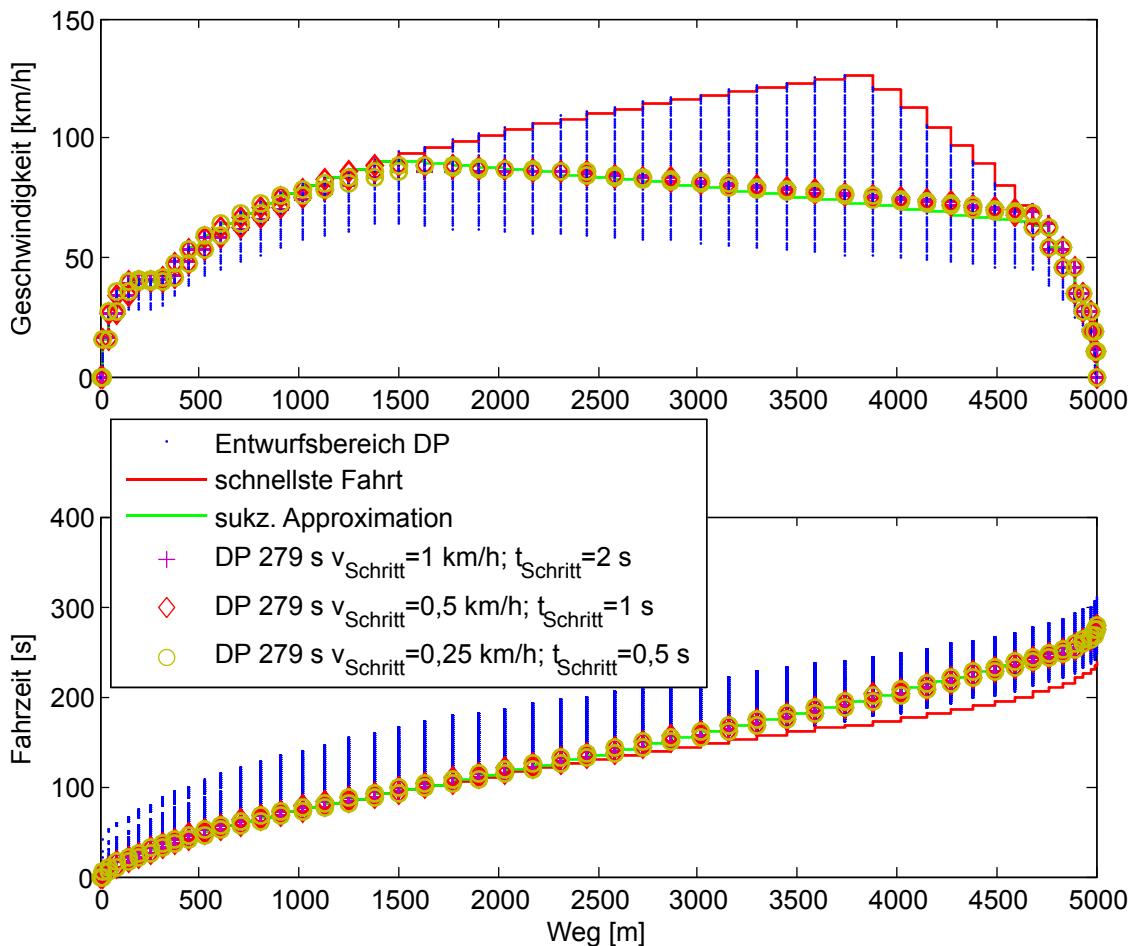


Abbildung 4-10: Darstellung der Fahrtrajektorien in Abhängigkeit von der Diskretisierung

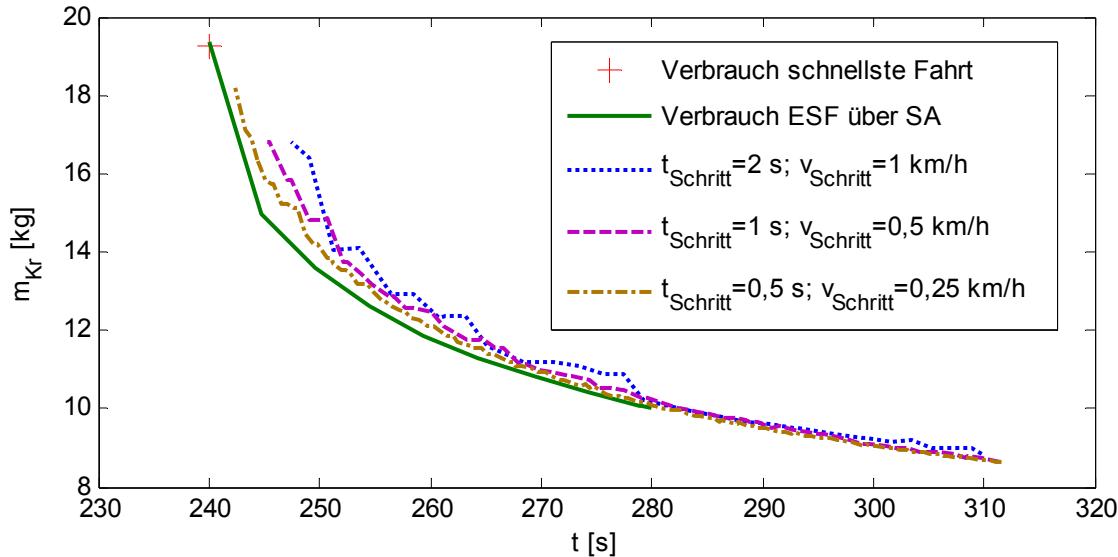


Abbildung 4-11: Kraftstoffverbrauch für verschiedene Mehrfahrzeiten

4.3.6 Weitere Ergebnisse

In Abschnitt 4.3.5 wurde bereits das Ergebnis der Fahroptimierung durch die DP mit der trajektorienbasierten energiesparenden Fahrweise verglichen. Im Folgenden sollen die Ergebnisse für den Extremfall eines stark hügeligen Profils bzw. für ein reales Fahrprofil dargestellt und diskutiert werden.

Bergige Strecke

Für die Darstellung der bergigen Strecke wurde ein Testprofil mit Rampen von bis zu 20 Promille genutzt, um die Effekte relativ starken Beschleunigens in Ausrollphasen sichtbar zu machen (Abbildung 4-12). Bemerkenswert ist, dass auch hier durch die DP Fahrtrajektorien gebildet werden, die zu einem hohen Anteil das rekuperative Verzögern beinhalten. Dies wird auch in der Darstellung der Leistungen (Abbildung 4-13) deutlich. Abgesehen von den schnellsten durch die DP berechneten Fahrten (274 s, 278 s) wird das rekuperative Verzögern bevorzugt, was an der Zwischenkreisleistung von ca. null erkennbar ist. Der Dieselmotor kann in diesen Phasen im Leerlauf ohne Last laufen. Bei der Betrachtung der fahrzeitabhängigen Einsparung zwischen der Berechnung mit DP und der Trajektorienoptimierung über die sukzessive Approximation (siehe Anhang: Abbildung C-6) kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse ähnlich sind. Bei Wahl einer sehr kleinen Schrittweite kann die DP aber nun für kurze Fahrzeiten ein geringfügig besseres Ergebnis als die sukzessive Approximation erzielen, was in der Ausnutzung kleinerer Potentiale der Lastpunktverschiebung begründet liegt.

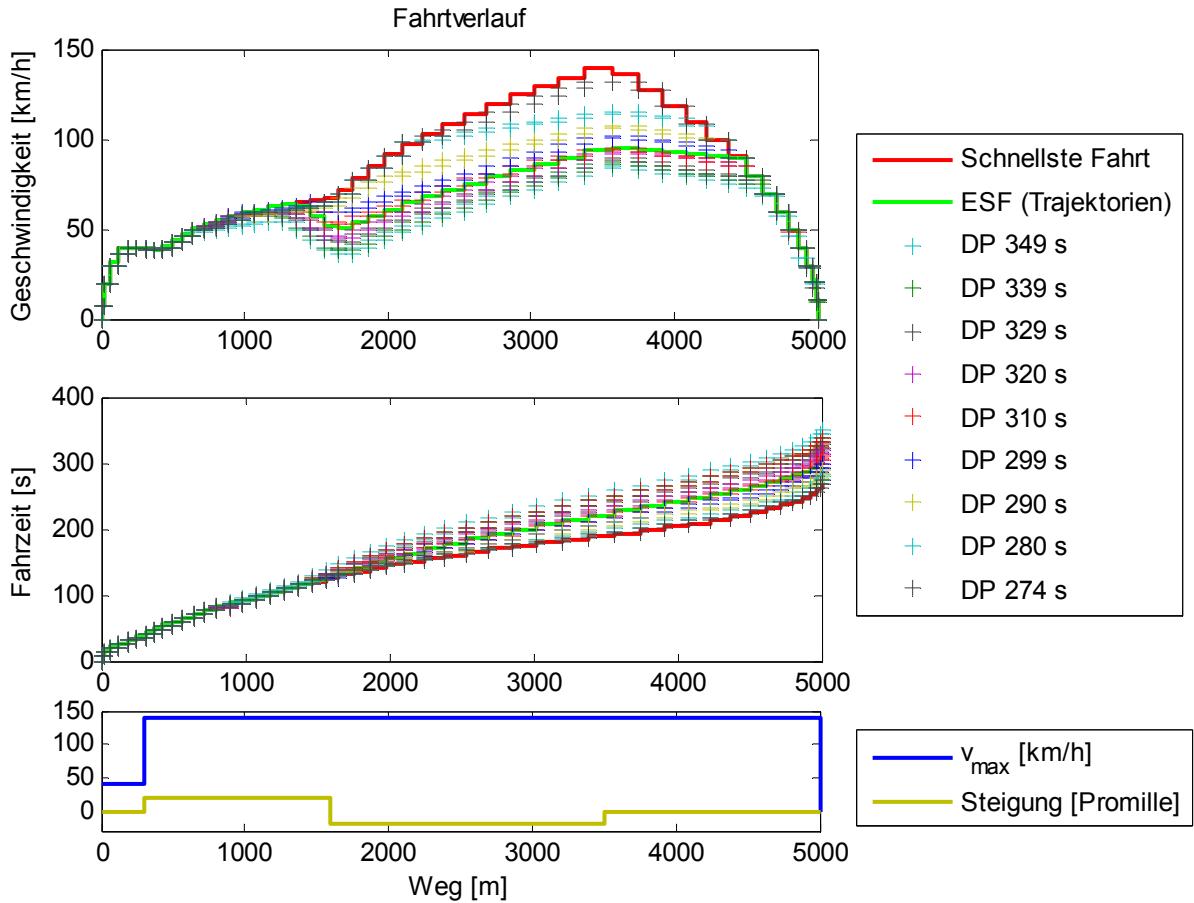


Abbildung 4-12: Optimierte Fahrtrajektorien für eine stark hügelige Strecke

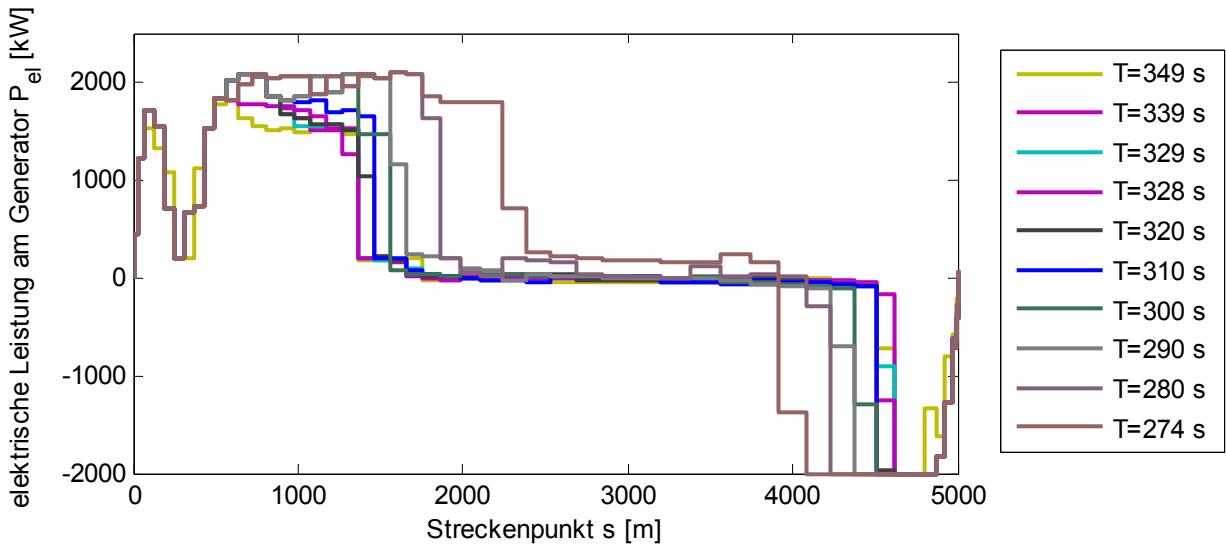


Abbildung 4-13: Leistungsverlauf verschiedener Fahrtrajektorien aus der DP

Reales Fahrprofil

Um die Leistungsfähigkeit der Programme für die Berechnung eines realen Fahrprofils zu überprüfen, wird das in Abbildung A-6 dargestellte Fahrprofil zwischen Cuxhaven und Stade als Referenz-

fahrt gewählt. Die beiden Optimierungsprogramme erzielen hinsichtlich der Verbrauchseinsparung ähnliche Ergebnisse. Die Einsparung liegt bei 25,5 Prozent für die Optimierung über Fahrtrajektorien und 28,5 Prozent für die dynamische Programmierung (siehe Anhang: Abbildung C-7). Die höhere Einsparung bei der Trajektorienoptimierung ist primär in der Wegschrittweite von 100 m begründet, wodurch einige kurze Änderungen der Neigung bei der Optimierung nicht berücksichtigt werden, da die Steigung nur am Start- und Endpunkt eines Optimierungsschritts Berücksichtigung findet. Die Auswirkungen sind unter anderem in den für kleine Abschnitte zu hohen Leistungsanforderungen zu sehen (Abbildung 4-14). Bei Weiterentwicklung der Methodik könnte die vorherige Ermittlung mittlerer Neigungen für die entsprechenden Wegabschnitte hilfreich sein, um die Ergebnisqualität weiter zu verbessern.

Den korrespondierenden Zeitverlauf erhält man durch nachträgliches Einfügen der bei der DP-Optimierung nicht berücksichtigten Haltezeiten. Dieser ist im Anhang dargestellt (Abbildung C-8).

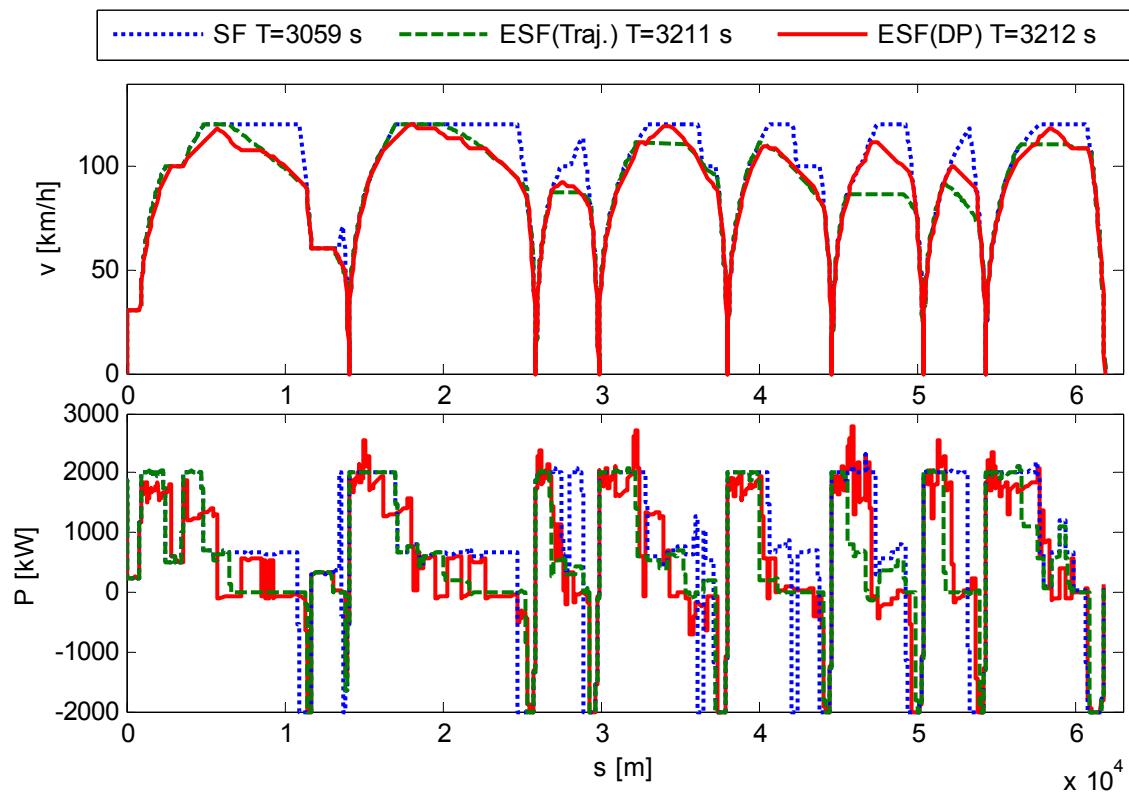


Abbildung 4-14: Fahrzeugschaubilder der energiesparenden Fahrweise im Vergleich zur schnellsten Fahrt

4.3.7 Zusammenfassende Betrachtung

Zur Ermittlung der energiesparenden Fahrweise wurde die Anwendung regelbasierter optimaler Fahrtrajektorien und der dynamischen Programmierung umgesetzt und geprüft. Die erzielten Einsparungen von über 25 Prozent gegenüber der schnellsten Fahrt sind beachtlich und bestätigen für das untersuchte Fahrzeug die auch in anderen Veröffentlichungen hervorgehobene Bedeutung der energiesparenden Fahrweise als effektives und kostengünstiges Mittel der Kraftstoffverbrauchsre-

duktion. Die durch den alternativen Weg über die DP gewonnenen Resultate bestätigen die gute Qualität der Ergebnisse der trajektorienbasierten energiesparenden Fahrweise. Die Ergebnisse der DP können bei Verringerung der Schrittweite gesteigert werden. Bei geringen Schrittweiten sind jedoch der Ressourcenbedarf und die Rechenzeit sehr hoch. Die Optimierung über Trajektorien mit Hilfe der sukzessiven Approximation hat den Vorteil, dass sie insbesondere für lange Strecken gute Rechenzeiten bietet, da nicht in jedem Optimierungsschritt alle Abschnitte neu berechnet werden müssen. Aufgrund der Integration über einen ODE-Solver mit variabler Schrittweite trifft die berechnete Fahrtrajektorie genauer günstige Lastpunkte als die dynamische Programmierung mit dem diskreten Zustandsraum. Dies wiegt bei den untersuchten Lastprofilen im Vergleich zur DP mit rechenbaren Optimierungsschrittweiten den Nachteil auf, dass gegebenenfalls nicht alle optimalen Lastpunkte durch die entworfenen Fahrstrategien abgedeckt werden.

Das eingeführte Fahrregime Rekuperation ist auch für Fahrzeuge ohne Speicher hilfreich. Eine einfache Umsetzung über eine Softwarefunktion, die eine automatische Anpassung der Bremsleistung an die elektrische Zwischenkreisleistung realisiert, ist möglich und kann eine größere Einsparung als das herkömmliche Ausrollen bringen.

4.4 Aufstellung und Optimierung von Speicherstrategien

Aufbauend auf der Auswahl eines für den Einsatzzweck geeigneten Energiespeichers (Abschnitt 2.6.3) muss eine Strategie für den Betrieb des Speichers gefunden werden, die zum einen dem Betriebsziel gerecht wird, zum anderen aber auch die Leistungsgrenzen des Speichers und ökonomisch relevante Aspekte wie die Speicheralterung berücksichtigt. Für das Referenzfahrzeug und das aufgestellte Betriebsziel der Rekuperation werden Speicherstrategien und die Möglichkeiten der Optimierung unter Zuhilfenahme der Vorausschau aufgezeigt.

4.4.1 Speicherstrategie nach Betriebsziel

Im Folgenden werden kurz mögliche Ansätze für die Erstellung von Speicherstrategien dargestellt, welche sich z. T. ergänzen bzw. miteinander kombiniert werden können.

Nutzung der Rekuperationsenergie

Ziel eines solchen Betriebes ist die Aufnahme und bestmögliche Nutzung der in Rekuperationsphasen rückgespeisten elektrischen Energie. Die Leistungsabgabe sollte so erfolgen, dass der Speicher in seinem optimalen Wirkungsgradpunkt arbeitet und die Unterstützung der VKM durch den Speicher die größte Wirkung auf den Kraftstoffverbrauch entfaltet. In jedem Fall muss jedoch der Speicher so weit entladen werden, dass er möglichst viel Energie im nächsten Rekuperationszyklus aufnehmen kann. Aus Sicht der Energieeinsparung stellt die Rekuperation die effizienteste Ladestrategie dar, da überschüssige Bremsleistung ohne zusätzlichen Kraftstoffverbrauch und zumindest in Bremsphasen auch ohne Generierung von Mehrfahrzeit erfolgt.

Lastpunktverschiebung

Hierbei wird der Energiespeicher zur Verschiebung des Lastpunkts innerhalb des Arbeitsbereichs der VKM genutzt. Eine mögliche Energieeinsparung resultiert aus der Ausnutzung optimaler Wirk-

kungsgradbereiche. Dabei ist zu beachten, dass das Einsparpotential pro Speicherumsatz aufgrund der nur geringen Wirkungsgradunterschiede der Lastpunkte einer VKM und der notwendigen Berücksichtigung des Speicherwirkungsgrads wesentlich kleiner ist als bei einer Rekuperationsstrategie. Ob diese unter Berücksichtigung des Speicherverschleißes dennoch lohnenswert ist, muss im Vorfeld mit Hilfe der Simulation berechnet werden. Einen Sonderfall der Lastpunktanhebung stellen Motor-Start/Stopp-Strategien dar.

Motor-Start/Stopp-Strategie

Bei Motor-Start/Stopp-Strategien wird die VKM in bestimmten Betriebsphasen abgeschaltet. Die Rolle des Energiespeichers besteht in der notwendigen Absicherung der Versorgung elektrischer Verbraucher in Motorabschaltphasen. Die Kraftstoffeinsparung durch die Motor-Start/Stopp-Funktion ist durch Vermeidung des Leerlaufverbrauchs größer als bei einer Lastpunktverschiebung ohne Motorabschaltung. Zu beachten ist, dass die konventionellen Startanlagen von Lokomotivmotoren in der Regel nicht für einen hochdynamischen Start/Stopp-Betrieb (Motorstopp bei jedem Halt) geeignet sind. Die Diskussion von Motor/Start-Stoppstrategien wird deswegen im Zusammenhang mit dem Mehrmotorenkonzept erfolgen, bei dem ein Starter-Generator einen schnellen verschleißfreien Start ermöglicht und die Abschaltung einzelner Motoren einen größeren Leistungsvorhalt und eine bessere Dynamik ermöglicht (siehe Kapitel 6).

Boostbetrieb

Eine Unterstützung der VKM über ihren ursprünglichen Betriebsbereich hinaus kann zu einer zeitlich begrenzten höheren Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs führen. Eine Kraftstoffeinsparung ist in Kombination mit der Nutzung des Fahrzeitgewinns mit der energieparenden Fahrweise erreichbar.

Downsizing

Soll die Möglichkeit bestehen, die Größe der VKM zu verringern, so muss der Speicher so betrieben werden, dass er jederzeit in der Lage ist, Belastungsspitzen auszugleichen. Es ist daher ein gewisses SOC-Niveau vorzuhalten. Wenn dieses bei Belastung unterschritten wird, kann der Speicher danach über die Lastpunktanhebung (LPA) wieder aufgeladen werden. Das Motordownsizing führt aufgrund des geringeren spezifischen Verbrauchs von Verbrennungsmotoren mit kleinerem Hubvolumen in der Regel zu einer Verbrauchseinsparung.

4.4.2 Möglichkeiten der Formulierung von Betriebsstrategien

Die Ladungsaufnahme und Ladungsabgabe von elektrischen Energiespeichern kann über leistungselektronische Bauelemente unter Berücksichtigung der Strom- und Spannungsrestriktionen weitestgehend frei gestellt werden (Abschnitt 2.6.7.). In einer Speichersteuerung, welche Signale von Fahrzeug- und Speicherseite verarbeitet, muss eine Betriebsstrategie formuliert werden, die das gewünschte Speicherverhalten an die Leistungselektronik des Speichers weitergibt.

Regelbasierte Verfahren

Die Umsetzung von Speicherstrategien in der Fahrzeugsteuerung erfolgt heute meist über regelbasierte Verfahren ([Wäl00], S. 143 ff., [Söf05], S. 87 ff., [LSWB11]). Diese zeichnen sich durch eine klare Definition des Systemverhaltens und eine gute Prüfbarkeit der Funktion mit Hilfe von Prototypen aus. Kriterien für das Speichermanagement über Regeln sind der aktuelle Fahrzeugzustand in Form der aktuellen Lastanforderungen und des Speicherzustands (Abbildung 4-15):

$$u_{\text{SPE}} = f(x, u_{\text{Last}}). \quad (4.43)$$

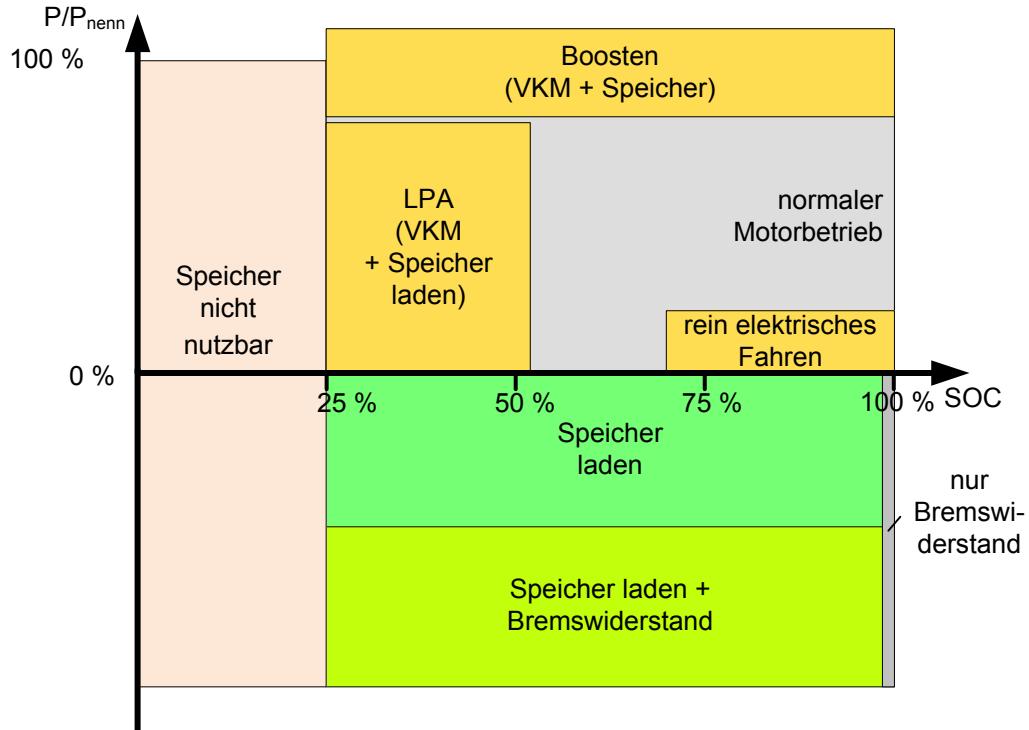


Abbildung 4-15: Schematische Darstellung von Speicherstrategien für ein dieselelektrisches Fahrzeug mit Doppelschichtkondensator in Abhängigkeit des Speicherladezustands (SOC) und den Leistungsanforderungen an das Fahrzeug (P/P_{nenn})

Die detaillierte Abbildung erfolgt über Zustandsdiagramme, in denen Zustandsautomaten mit Zuständen und den Schaltbedingungen (Transitionen) dargestellt sind. Durch eine geeignete Parametrierung der Transitionen kann ein Zweipunktschaltverhalten erreicht werden, welches das schnelle Hin- und Herschalten (Toggeln) zwischen den Zuständen verhindert (Abbildung 4-16). Jedem diskreten und beschränkten Zustand ζ_{SPE} aus der endlichen Menge Z_{SPE} ist nun ein gewisser Satz von Regeln zugeordnet, welche die Speichersteuerung beschreiben:

$$\begin{aligned} \zeta_{\text{SPE}} &= f_1(\zeta_{\text{SPE,vor}}, x, u_{\text{Last}}), \\ u_{\text{SPE}} &= f_2(\zeta_{\text{SPE}}, x, u_{\text{Last}}) \end{aligned} \quad (4.44)$$

mit $\zeta_{\text{SPE}} \in Z_{\text{SPE}}$ und Anfangszustand $\zeta_{\text{SPE},0}$.

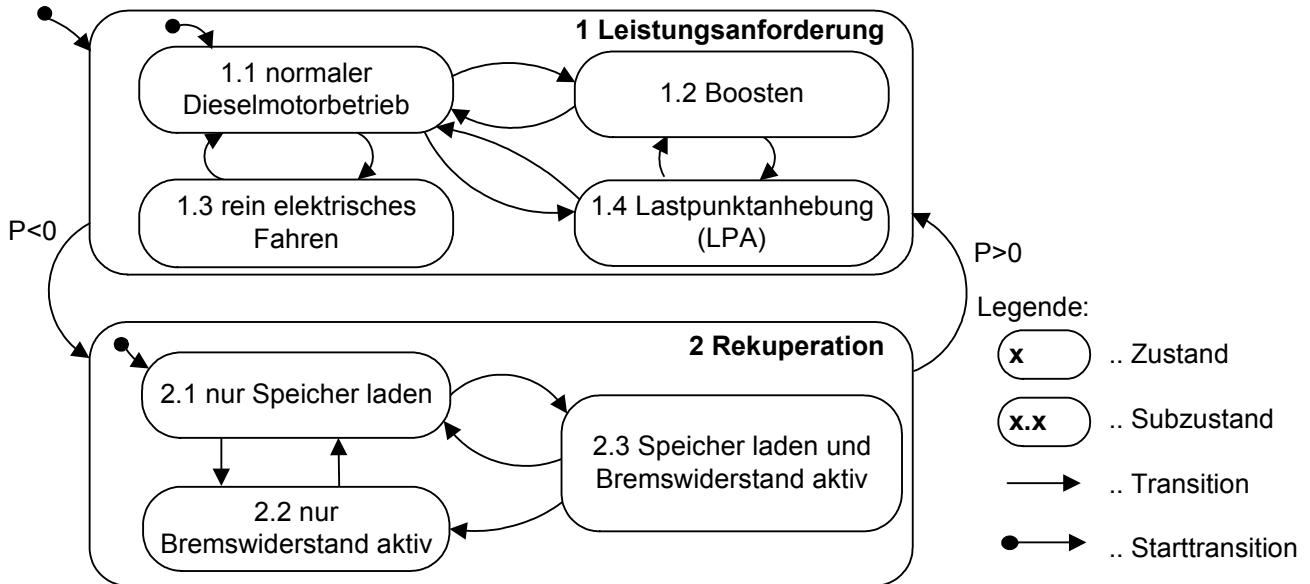


Abbildung 4-16: Zustandsautomat für die Speichersteuerung eines dieselelektrischen Fahrzeugs (schematisch)

Eine Sonderform sind selbstlernende adaptive Zustandsautomaten, welche die Transitionsbedingungen bzw. die Regeln mit Hilfe von Lernalgorithmen anpassen [KKJ+05].

Äquivalenzkostenbasierter Betrieb

Eine weitere Möglichkeit der Formulierung von Betriebszuständen ist der äquivalenzkostenbasierte Betrieb (engl. Equivalent Consumption Minimization Strategy – ECMS). Hierbei wird eine Entscheidung über die Batterieansteuerung basierend auf einem zu definierendem Äquivalenzkostenfaktor getroffen, welcher einen linearen Strafterm darstellt. Dies kann das Problem der langwierigen und komplizierten Wahl von optimalen Parametern für regelbasierte Strategien, zumindest unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz, deutlich abschwächen [SBG04]. Die Entscheidung wird für einen Zeitpunkt in Abwägung der Äquivalenzkosten aus dem Kraftstoffverbrauch und der Änderung des energetischen Ladezustands der Batterie getroffen [KB11]:

$$\dot{m}_{Kr,\text{äqui}} = \dot{m}_K + \lambda \cdot P_{i,\text{SPE}}. \quad (4.45)$$

Ein optimierter Speicherbetrieb u_{SPE} ergibt sich nun aus der Anwendung derjenigen Steuerung, die zu den minimalen Kraftstoffkosten führt:

$$u_{\text{SPE}} = \arg \min_{u_{\text{SPE}} \in u_{\text{SPE,zul}}} [\dot{m}_{Kr,\text{äqui}}(u_{\text{SPE}}, \lambda)]. \quad (4.46)$$

Vorteil der äquivalenzkostenbasierten Optimierung ist ein automatisches Auffinden effizienter Punkte für das Laden und Entladen des Speichers. Bei unbekanntem Fahrtverlauf ist die Wahl eines geeigneten Äquivalenzkostenfaktors kritisch. Ein falsch gewählter Äquivalenzkostenfaktor führt zu einer überproportionalen Gewichtung von Ladung bzw. Entladung.

Der dieselelektrische Zug mit Energiespeicher im Vergleich zu Hybridautos eine höhere leistungsbezogene Rekuperationsquote auf, da sowohl der Fahrwiderstand⁵¹ als auch das Leistungsgewicht⁵² um mindestens den Faktor zehn geringer sind. Weiterhin gibt es weniger verkehrsbedingte Zwischenbremsungen. Dies führt dazu, dass Energiespeicher in der Regel in einer Bremsphase komplett geladen werden können. Hier tritt eine Schwäche des ECMS zu Tage, weil bei limitierten Ladungszustandsgrenzen ohne vorausschauende Anpassung der Äquivalenzkostenfaktoren suboptimale Lösungen entstehen ([KKJ+05], [SOR09]).

Vorausschauender Betrieb

Eine weitere Ergänzung stellt der „vorausschauende Betrieb“ dar. Die vorausschauende Fahrt optimierung wurde im vorangegangenen Abschnitt 4.3 bereits diskutiert. Auch für den Speicher kann unter Kenntnis des Leistungsbedarfs über einen gewissen Zeithorizont $u_{\text{Last,präd}}$ eine hinsichtlich des Betriebsziels optimale Fahrstrategie gefunden werden:

$$u_{\text{SPE}} = f(x, u_{\text{Last}}, u_{\text{Last,präd}}). \quad (4.47)$$

Sollte ein vorausschauender Betrieb in Echtzeit nicht möglich sein, bietet sich für die Applikation von regelbasierten Strategien die Nutzung von streckenoptimierten vorausschauenden Regimen zur Verbesserung der Parametrierung für ein bestimmtes Betriebsziel an.

4.4.3 Randbedingungen und Grenzen

Die Definition von Batterien und Doppelschichtkondensatoren im erstellten Simulationsprogramm Hybrid Train Optimizer wurde bereits in Abschnitt 3.8.5 erläutert. Im Folgenden sollen die für die Beschreibung des Optimierungsproblems relevanten Beziehungen und Randbedingungen noch einmal kurz dargestellt werden. Mit modernen DC/DC-Wandlern kann bei korrekter Dimensionierung des Spannungsstellbereichs die Speicherladung und -entladung innerhalb der zulässigen Grenzen beliebig gesteuert werden. Bei einigen Fahrzeugauslegungen kann die Speicherleistung jedoch durch die Leistungsgrenzen des DC/DC-Wandlers beschränkt sein:

$$|P_{\text{DC/DC}}| < P_{\text{DC/DC,max}}. \quad (4.48)$$

Weiterhin sind die in Abschnitt 2.6 beschriebenen Eigenschaften der Energiespeicher in Form von Strom- und Spannungsgrenzen bindend:

$$P_{i,l}(t) < P_{i,l,\max} \quad \text{und} \quad P_{i,entl}(t) > P_{i,entl,max}. \quad (4.49)$$

Außerdem können die Energiespeicher nur in einem begrenzten Ladezustandsbereich betrieben werden. Der ausgenutzte Ladehub ist Teil der Auslegung des Speichersystems und hat die in den

⁵¹ Beispielhaftes Kraftfahrzeug: $F_A = F_R + F_L = \mu_R \cdot m \cdot g + 0,5 \cdot c_w \cdot A \cdot \rho_L \cdot v^2 = 760,8 \text{ N}$ mit $m = 1,3 \text{ t}$, $A = 1,9 \text{ m}^2$, $c_w = 0,4$ und $\mu_R = 0,03$. Dies entspricht 585 N/t bei $v=100 \text{ km/h}$. Betrachteter Zug: $F_A = 10,29 \text{ kN}$ bei $m = 344,9 \text{ t}$. Dies entspricht $29,83 \text{ N/t}$.

⁵² Durchschnittliches in Deutschland zugelassenes Kraftfahrzeug: 87 kW bei ca. 1300 kg . Dies entspricht 67 kW/t [KBA10]. Betrachteter Zugverband: 2200 kW bei $344,9 \text{ t}$. Dies entspricht $6,37 \text{ kW/t}$.

Grundlagen (Abschnitt 3.7) beschriebenen Rückwirkungen insbesondere auf die Lebensdauer des Speichers. Somit gilt für den energetischen Ladezustand der Speicher:

$$\text{SOC}_{\min} < \text{SOC} < \text{SOC}_{\max}. \quad (4.50)$$

Die konkurrierenden Zielfunktionen bei der Auslegung der Betriebsstrategie sind die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs

$$m_{Kr,\min} = \min_{u_2(t)} \int_{t_A}^{t_E} \dot{m}_{Kr}(u_1, u_2, s, v) dt \quad (4.51)$$

und die Maximierung der Lebensdauer des Energiespeichers unter Berücksichtigung von zyklenbasierter Lebensdauerbeschränkung L_{Zyklen} und zeitlicher Lebensdauerbeschränkung L_{Zeit} :

$$L_{\max} = \max_{u_2(t)} [L_{\text{Zyklen}}(u_1, u_2, s, v), L_{\text{Zeit}}]. \quad (4.52)$$

In der Regel liegt jedoch die zyklenbasierte Lebensdauer bei Hybridfahrzeugen und Dauereinsatz weit unter der zeitlichen Lebensdauer der Speicher, weshalb diese vernachlässigt werden kann. Es ist möglich, die Kraftstoffeinsparung und den Ladungsumsatz über die Kosten zu bilanzieren. Der Speichereinsatz lohnt sich dann, wenn für die Kraftstoffeinsparung pro Speicherumsatz gilt:

$$\frac{dV_{Kr}}{dE_{\text{SPE,Umsatz}}} > \frac{K_{E,\text{SPE}}}{N_{\text{Vollzyklen}} \cdot K_{Kr}}. \quad (4.53)$$

Dabei sind die Kraftstoffkosten K_{Kr} , die energiebasierten Speicher Kosten $K_{E,\text{SPE}}$ und die Zahl der möglichen Ladungsumsätze in Vollzyklen $N_{\text{Vollzyklen}}$, welche vom Speichertyp und der Entladetiefe abhängig ist, zu berücksichtigen. Das Ergebnis ist in Abbildung 4-17 dargestellt. Bei der Abschätzung von einem Energieäquivalent von 0,25 l/kWh⁵³ wird deutlich, dass die Rekuperation von Bremsarbeit im Hybridbetrieb⁵⁴ wirtschaftlich ist. Eine Verbrauchseinsparung durch Lastpunktverschiebung müsste jedoch mit einer erheblichen Erhöhung des Motorwirkungsgrads einhergehen. Eine korrigierte Kostenfunktion für den Verbrauch, welche die Speicheralterung mit einschließt, kann somit wie folgt formuliert werden:

$$m_{Kr,\text{korr},\min} = \min_{u_2(t)} \int_{t_A}^{t_E} \dot{m}_{Kr}(u_1, u_2, s, v) + \dot{m}_{Kr,LD} [P_{\text{SPE},i}, N_{\text{Vollzyklen}}, K_{Kr}, K_{E,\text{SPE}}] dt \quad (4.54)$$

$$\text{mit } N_{\text{Vollzyklen}} = f(\text{DOD}, P_{\text{SPE,l,max}}, P_{\text{SPE,entl,max}}).$$

In den nachfolgenden Rechnungen werden verschiedene Speichertypen verwendet. Die Parametrierung für den Doppelschichtkondensator, High-Energy-Li-Ionen-Batterie (HE-Li-Ionen-Batterie) und High-Power-Li-Ionen-Batterie (HP-Li-Ionen-Batterie) erfolgt anhand von Referenzspeichern. Die verwendeten Speicherparameter sind in Tabelle B-2 dargestellt.

⁵³ bei einem spezifischen Kraftstoffverbrauch von 210 g/kWh und einer Dichte von 0,83 kg/l

⁵⁴ Im Hybridbetrieb können Batterien in der Regel mehr als 10.000 Vollzyklen genutzt werden (Abbildung A-1).

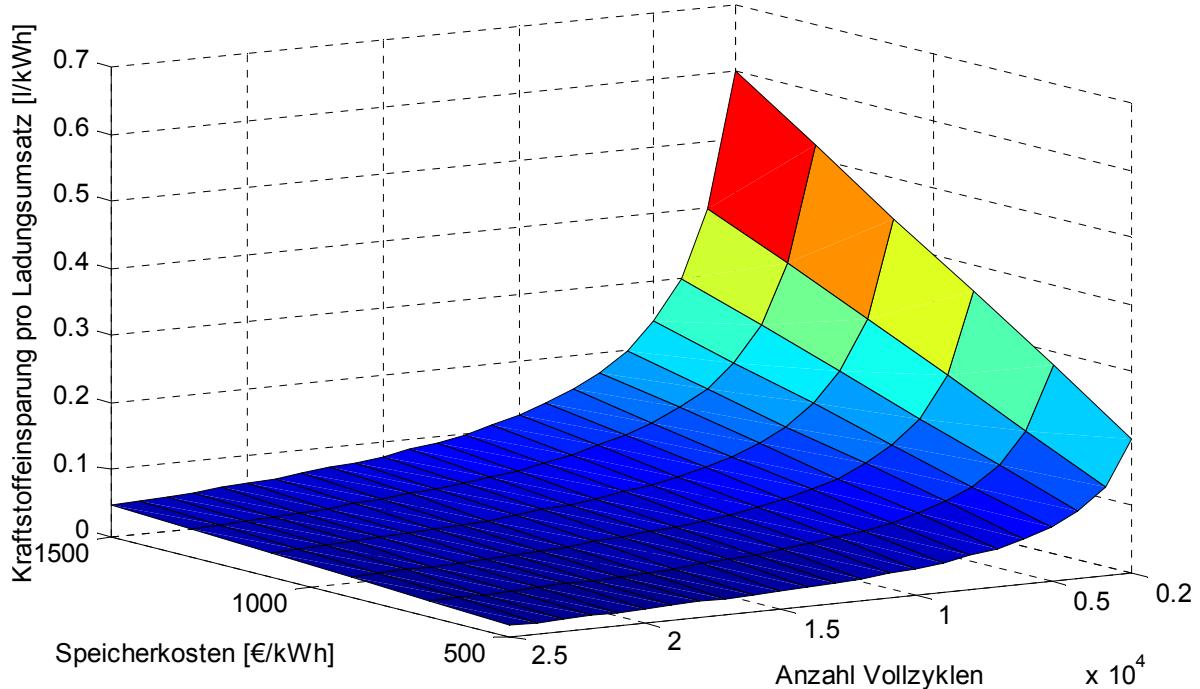


Abbildung 4-17: Notwendige Kraftstoffeinsparung pro Ladungsumsatz (Kraftstoffpreis 1,25 €/l)

4.4.4 Entwicklung von regelbasierten Strategien

Zur Evaluation des möglichen Potentials von vorausschauenden Speicherstrategien sollen statische, regelbasierte Betriebsstrategien für ausgewählte Betriebsziele aufgestellt werden.

Nutzung der Rekuperationsenergie

Die Strategie für die bestmögliche Nutzung der Rekuperationsenergie basiert auf der Rückgewinnung von Energie in Bremsphasen. Der Speicher kann erst wieder geladen werden, wenn eine Entladung erfolgt ist. Deshalb ist die Entladung bei vollkommen unbekanntem Einsatzprofil in der Regel so hoch wie möglich anzusetzen. Da im Bahnbetrieb davon auszugehen ist, dass die Traktionszyklen länger als die Bremszyklen andauern, kann der Entladefaktor k_{entl} angepasst und damit die Entladeverluste minimiert werden. Folgende Gleichung beschreibt die Strategie bei Vorgabe der Speicherleistung $P_{a,\text{SPE,rek}}$:

$$P_{a,\text{SPE,rek}} = \begin{cases} \min(P_{a,\text{entl,max}} \cdot k_{\text{entl}}, P_{ZK,\text{el}}) & \text{Entladen} & P_{ZK,\text{el}} > 0 \wedge \text{SOC}_{\text{SPE}} > \text{SOC}_{\min} \\ \max(P_{a,l,\text{max}}, P_{ZK,\text{el}}) & \text{Rekuperation} & P_{ZK,\text{el}} < 0 \wedge \text{SOC}_{\text{SPE}} < \text{SOC}_{\max} \\ 0 & \text{sonst} & \end{cases}. \quad (4.55)$$

In Abbildung 4-18 ist der Verlauf des Speicherinhalts in einer Vergleichsrechnung für verschiedene Entladefaktoren dargestellt.

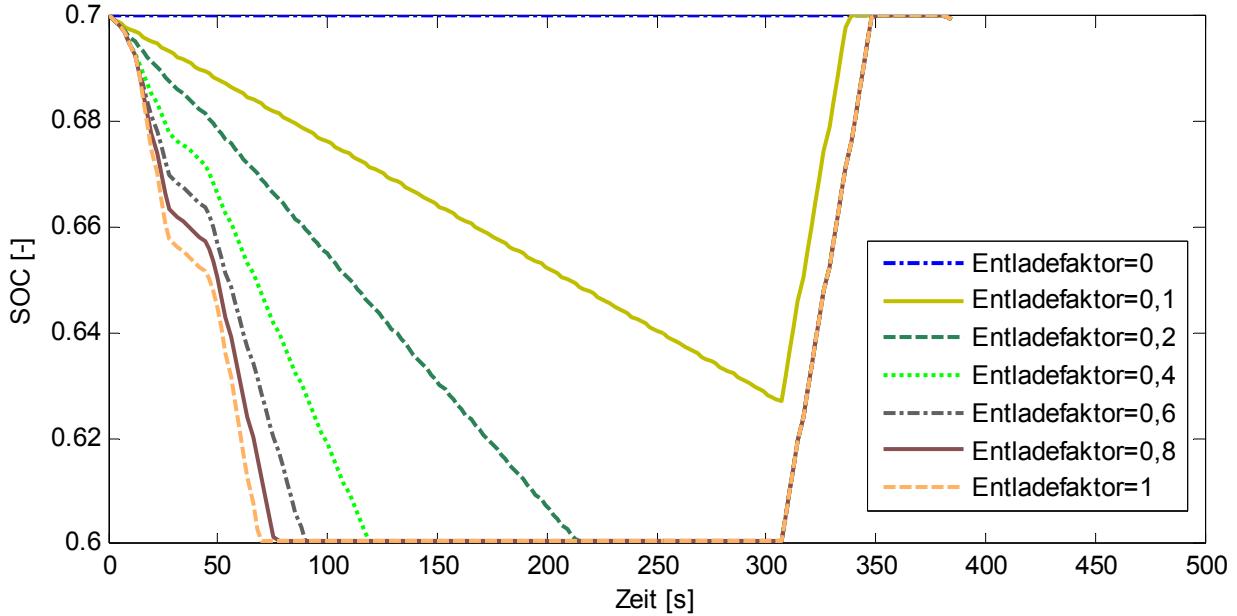


Abbildung 4-18: Auswirkung des Entladefaktors auf den Verlauf des energetischen Ladezustands

Es kann festgestellt werden, dass die Kraftstoffeinsparung durch Absenkung des Entladefaktors erheblich gesteigert werden kann (Tabelle 4-1). Die Verbrauchseinsparung bei Verwendung eines kleineren Entladefaktors beträgt fast fünf Prozentpunkte. Ursache ist der Anstieg des Entladewirkungsgrades durch die Reduzierung der Verlustwärme. Wird der Entladefaktor jedoch zu klein gewählt, entlädt der Speicher sich zu langsam und in der nachfolgenden Rekuperationsphase kann nicht die volle Energiemenge aufgenommen werden.

Tabelle 4-1: Einfluss des Entladefaktors auf die Verbrauchseinsparung (Begrenzung der maximalen Speicherleistung durch DC/DC-Wandler: 2 MW, nominelle Speicherenergie: 20 kWh, flache Strecke, schnellste Fahrt)

Entladefaktor [-]	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Entladewirkungsgrad [%]	-	98,7	97,4	94,9	92,3	89,7	87,2
Masse des verbrauchten Kraftstoffs [kg]	30,05	26,32	24,71	25,32	25,61	25,78	25,87
relativer Mehrverbrauch [%]	21,62	6,54	0	2,47	3,66	4,34	4,70

Boostbetrieb

Im Boostbetrieb steht die Zugkraftsteigerung der Lokomotive im Vordergrund, welche im höheren Geschwindigkeitsbereich durch eine Unterstützung der VKM durch den Energiespeicher erreicht wird. Im Unterschied zur Rekuperationsstrategie ist es für die Verfügbarkeit dieser Leistungssteigerung günstig, einen zu definierenden Ladegrad des Speichers $SOC_{Vorhalt}$ für die Leistungsstützung vorzuhalten. Dieser liegt zwischen dem maximalen und minimalen SOC und soll über einen Vorhaltegrad $k_{Vorhalt}$ definiert werden:

$$SOC_{Vorhalt} = SOC_{\min} + (SOC_{\max} - SOC_{\min}) \cdot k_{Vorhalt}. \quad (4.56)$$

Im darüber liegenden Bereich des Ladezustands wird auf eine Rekuperationsmöglichkeit gewartet. Eine Entladung des Speichers sollte nur erfolgen, wenn es für das Boosting notwendig ist:

$$P_{a,SPE,boost} = \begin{cases} \min(P_{a,entl,max}, P_{ZK,cl} - P_{GEN,el,max}) & \text{Boosten} \\ \max(P_{a,l,max}, P_{GEN,el,max} - P_{ZK,cl}) & \text{LPA} \\ \max(P_{a,l,max}, P_{ZK,cl}) & \text{Rekuperation} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.57)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Boosten} & P_{ZK,cl} - P_{GEN,el,max} > 0 \wedge SOC_{SPE} > SOC_{\min} \\ \text{mit der Fallunterscheidung: LPA} & P_{ZK,cl} > 0 \wedge SOC_{SPE} < SOC_{Vorhalt} \\ \text{Rekuperation} & P_{ZK,cl} < 0 \wedge SOC_{SPE} < SOC_{\max} \end{array}$$

Die Auswirkungen der Variation des Vorhaltegrads auf den Verlauf des Ladezustands sind in Abbildung 4-19 dargestellt. Es wird eine erhebliche Unterstützung der VKM angenommen, welche einer Leistungssteigerung der VKM von 506 kW entspricht. Damit wird eine Fahrzeitreduktion von 2,73 Prozent erreicht. Bei hohem Vorhaltegrad wird der Speicher sofort nach der Belastung wieder komplett aufgeladen. Bei geringerem Vorhaltegrad erfolgt eine Ladung nur bis zu einem definierten Ladezustand, die restliche Ladung wird erst in der darauffolgenden Bremsphase rekuperiert. Bei Applikation einer solchen Strategie wird das Risiko in Kauf genommen, dass bei erneut hohem Leistungsbedarf, z. B. bei einer Steigung, nicht mehr der maximale Speicherinhalt zur Verfügung steht.

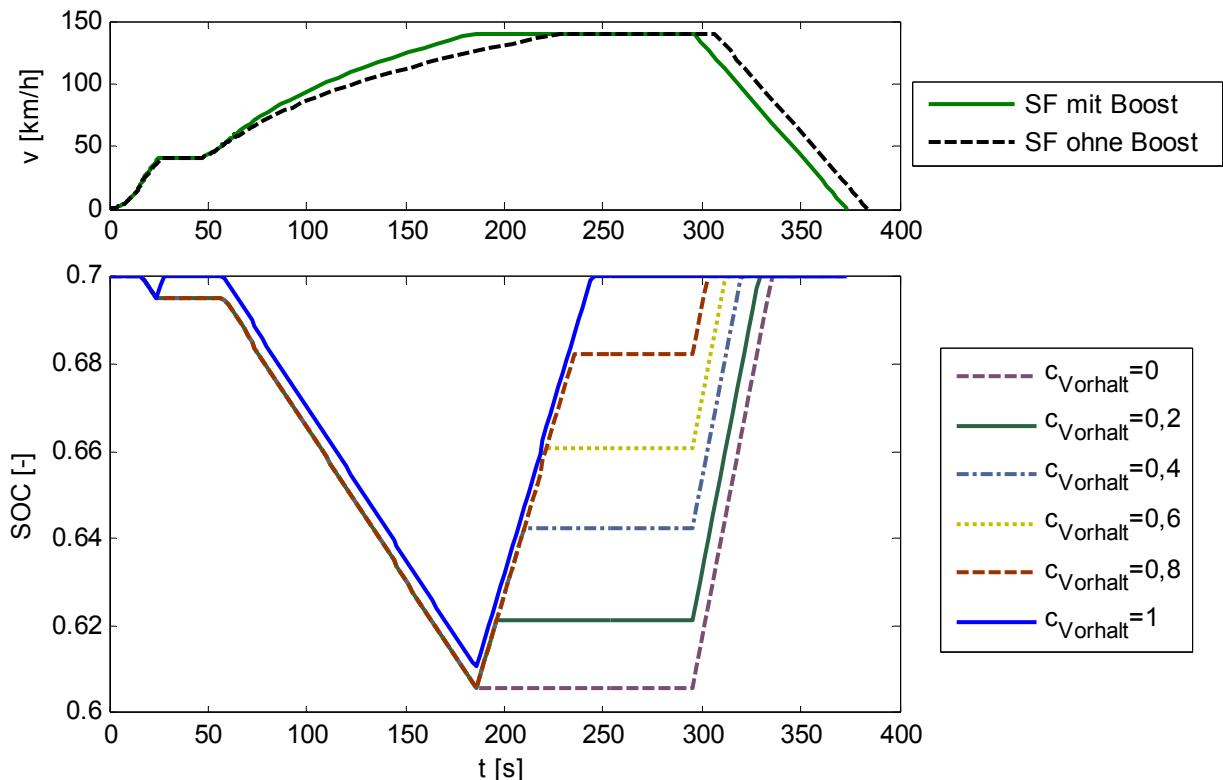


Abbildung 4-19: Vergleich verschiedener Booststrategien für eine flache Strecke

Ein niedriger Vorhaltegrad kann jedoch einen erheblichen Verbrauchsvorteil bedeuten, wie der Vergleich des Kraftstoffverbrauchs in Tabelle 4-2 zeigt. Wird der Speicher nicht über Rekuperation aufgeladen, erhöht sich der Kraftstoffverbrauch maßgeblich.

Tabelle 4-2: Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit vom Vorhaltegrad

Vorhaltegrad [-]	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Masse des verbrauchten Kraftstoffs [kg]	25,9	26,66	27,74	28,66	29,73	30,6
relativer Mehrverbrauch [%]	0,00	2,96	7,10	10,65	14,79	18,15

4.4.5 Vorausschauender Speicherbetrieb

Bei der Betrachtung der regelbasierten Strategien wurde festgestellt, dass sowohl bei einer beabsichtigten Rekuperationsstrategie als auch für ein effizientes Boosten ein vorausschauender Speicherbetrieb von Vorteil ist. Die Umsetzung prädiktiver Speichersteuerungen ist aus kraftfahrzeugtechnischen Untersuchungen bekannt. Dort ist aufgrund der Beeinflussung durch andere Verkehrsteilnehmer bzw. die unklare Routenführung nur ein kleiner Zeitbereich prädizierbar [CSKB07]. Ähnliches trifft auch auf den nichtautomatischen Kranbetrieb in Häfen zu [Mul09]. Bei Schienenfahrzeugen ist die Prädiktion der Leistungsanforderungen jedoch bezogen auf den nächsten Fahrtabschnitt für Fahrzeuge mit Fahrerassistenzsystem realisierbar, da die Streckenführung, die Höchstgeschwindigkeiten und der Ort des nächsten Halts bekannt und Störungen zumindest bezogen auf den Fahrtabschnitt zum nächsten Halt selten sind.

Die verwendete Methodik des vorausschauenden Speicherbetriebs basiert auf der dynamischen Programmierung nach BELLMANN, wie sie in Abschnitt 4.2.3 eingeführt und bereits in Abschnitt 4.3.5 bei der Fahroptimierung angewendet wurde. Die Implementierung der Speichersteuerung weist jedoch grundlegende Differenzen zur vorangegangenen Optimierung auf. Zum einen wird bei bekanntem Leistungsverlauf eine Zeitschrittintegration durchgeführt, zum anderen reduziert sich die Zahl der betrachteten Zustände auf den Ladezustand des Speichers (SOC). Weiterhin kann bei konstanter Zeitschrittweite und entsprechender Diskretisierung des Ladezustands immer eine konstante Zahl von Speicherleistungen gestellt werden. Damit tritt keine Unschärfe bei dem Vergleich von im Bereich eines Diskretisierungspunktes liegenden abweichenden Zuständen auf, weil die definierten SOC-Zustände genau getroffen werden.

Realisierung

Die optimierte Trajektorie des Speicherladezustands π_{SPE} liefert nach Definition eines Startwerts SOC_0 den minimalen Kraftstoffverbrauch

$$m_{Kr,\min}(SOC_0) = \min_{\pi_{SPE} \in \Pi} m_{Kr,\pi}(SOC_0) \quad (4.58)$$

und wird über die Rückwärtsrekursion

$$\begin{aligned}
 m_{Kr,i}(\underline{\text{SOC}}_{k-1}) &= \min_{\underline{\text{SOC}}_{k-1} \in \text{SOC}_{zul}} \left[m_{Kr,k}(\underline{\text{SOC}}_k) + \Delta m_{Kr,k-1} \left(P_{VKM,k-1} \right) \right] \\
 \text{mit } P_{VKM,k-1} &= f(P_{SPE,i}(\underline{\text{SOC}}_{k-1} - \underline{\text{SOC}}_k), P_{ZK,k}, \Delta t_{\text{Schritt}}) \\
 \text{unter den Nebenbedingungen } P_{VKM,k} &\subset P_{VKM,zul}, \quad P_{SPE,i,k} \subset P_{SPE,i,zul} \\
 \text{und der Randbedingung } \text{SOC}(t_E) &= \text{SOC}_N
 \end{aligned} \tag{4.59}$$

ermittelt. Die Implementierung unter Nutzung von Matrixoperationen ist schematisch in Abbildung 4-20 dargestellt. Mit Hilfe der Vorwärtsrekursion

$$\text{SOC}_{k+1} = f_1(\text{SOC}_k, t_k) \tag{4.60}$$

kann nun unter Vorgabe von

$$\text{SOC}_0 = \text{SOC}_N \tag{4.61}$$

eine ausgeglichene Ladungsbilanz erreicht werden. Dies macht den schwierigen nachträglichen Ausgleich differenzierender Ladezustände (vgl. Abschnitt 3.8.6) unnötig und erhöht so die Ergebnisqualität. Kann das Ziel nicht erreicht werden, ist der berechnete Verbrauch um das Äquivalent des Speicherinhalts zu erhöhen. Das simulierte Fahrspiel kann in diesem Fall nicht ohne Zwischenladung dauerhaft abgefahren werden.

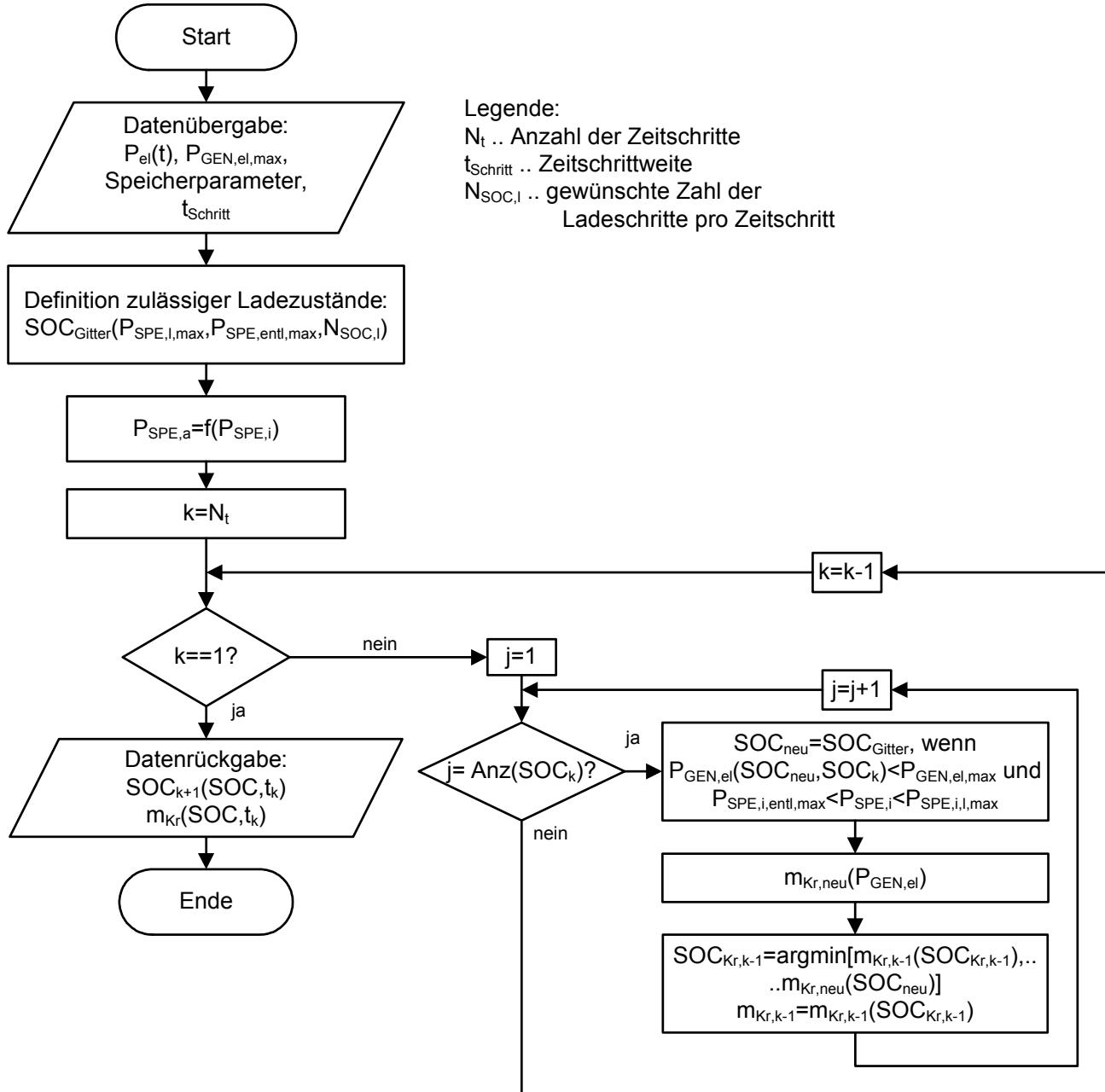


Abbildung 4-20: Ablauf der Rekursion bei der Anwendung der dynamischen Programmierung für die Speichersteuerung

Für eine Vergleichsrechnung wird das bereits in Abbildung 4-8 dargestellte Fahrprofil („flache Strecke“) gewählt, welche ohne Fahrzeitreserve als Spitzfahrt absolviert wird. In der Ergebnisgrafik sind die vom definierten Endzustand erreichbaren Ladezustandspunkte und der optimierte Verlauf des Ladezustands gezeigt (Abbildung 4-21, oben). Im Weiteren sind die daraus resultierende äußere Leistung am Speicher und die Entlastung des Generators abgebildet (unten), welche letztendlich zur Kraftstoffeinsparung führen. Dabei fällt auf, dass die HE-Li-Ionen-Batterie in der zur Verfügung gestellten Rekuperationszeit nicht vollständig geladen werden kann. Die Ladung der HP-Li-Ionen-Batterie und des Doppelschichtkondensators ist dagegen ohne Probleme möglich. Zu Beginn des Fahrspiels wird in einer Konstantfahrphase mit verminderter Traktionsleistung eine Last-

punktanpassung durchgeführt. Dies ist der Fall, weil hier eine reine Verbrauchsoptimierung ohne Berücksichtigung der Speicheralterung durchgeführt wird.

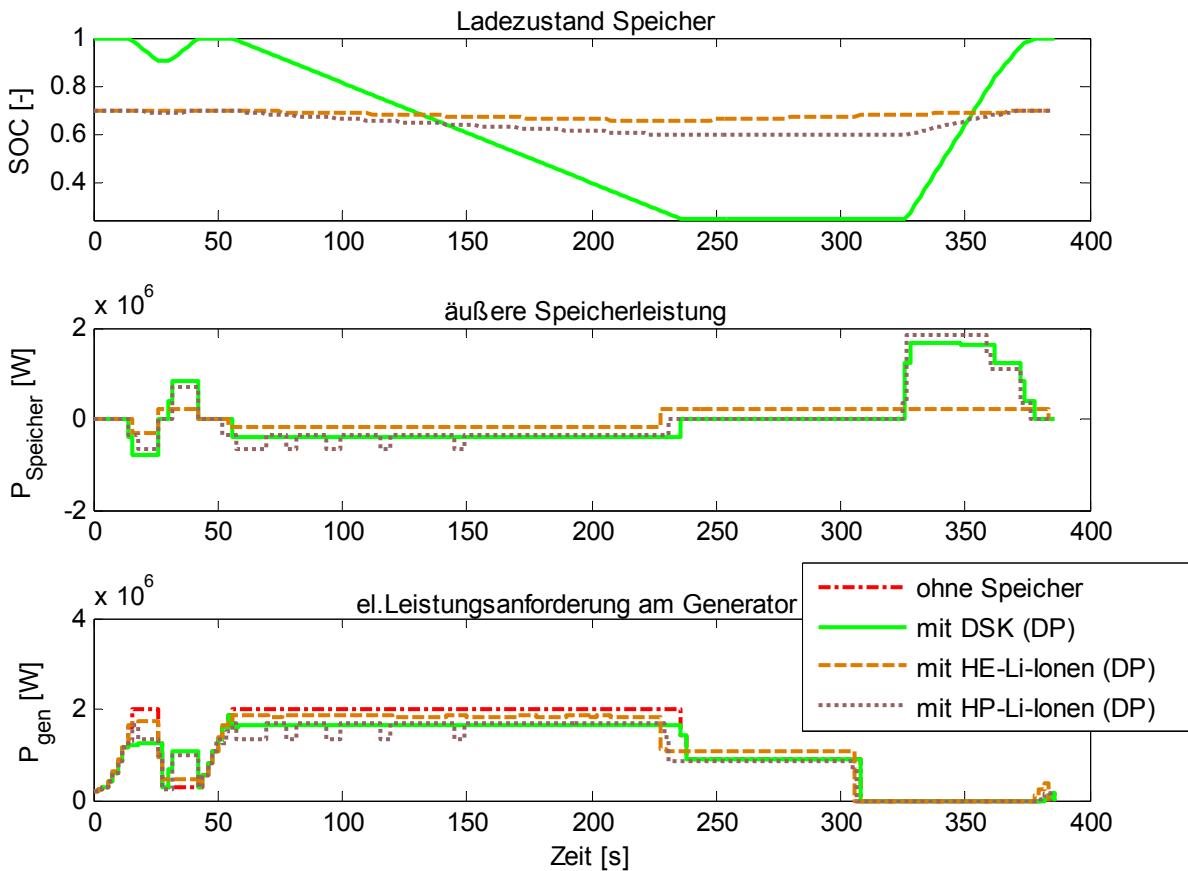


Abbildung 4-21: Ergebnis einer dynamischen Programmierung (20 kWh nutzbare Speicherenergie, flache Strecke)

4.4.6 Untersuchung der ECMS

Im Gegensatz zu den vorgestellten regelbasierten Strategien bietet die ECMS die Möglichkeit, ohne aufwändiges Einstellen von Parametern ein echtzeitfähiges Verfahren umzusetzen, welches einen kraftstoffsparenden Speichereinsatz ermöglicht. Bei der Bewertung der ECMS sind zwei Anwendungsfälle zu unterscheiden, die quasi nicht restriktierte Speichernutzung und die Speichernutzung unter Erreichung der Ladezustandsgrenzen.

Quasi unbegrenzter Speicherinhalt

Bei diesem Fall wird davon ausgegangen, dass der nutzbare Speicherinhalt groß gegenüber der in Rekuperationsphasen aufgenommenen Energiemenge ist. Mit Hilfe der ECMS kann nun bei Einstellung eines geeigneten Äquivalenzkostenfaktors λ die optimale Speicherstrategie gefunden werden. Der Äquivalenzkostenfaktor ist für jeden Streckentyp neu zu bestimmen. Das Speicherverhalten, repräsentiert durch den SOC, ist für die flache Strecke in Abbildung 4-22 dargestellt. Zur Nachstellung eines nahezu unbegrenzten Speicherinhalts wurde ein High-Power-Li-Ionen-Energiespeicher mit 5.000 kWh Nennenergie und einer Masse von 16,8 t parametriert. Es ist fest-

zustellen, dass bei niedrigem Äquivalenzkostenfaktor mehr Speicherleistung abgefordert wird. Damit kommt es zu einer sukzessiven Entladung des Speichers. Wird der Äquivalenzkostenfaktor zu hoch angesetzt, dominieren die Ladephasen und der SOC steigt an. Bei Annahme eines wiederholenden Befahrens der bestimmten Strecke muss der Äquivalenzkostenfaktor so gewählt werden, dass der Anfangsladezustand wieder erreicht wird. Die Ermittlung des Äquivalenzkostenfaktors mit ausgelielter Ladebilanz $\lambda_{\text{ausgeglichen}}$ kann über eine iterative Suche erfolgen. Für diesen entspricht der resultierende berechnete Speicherverlauf weitestgehend dem der dynamischen Programmierung.

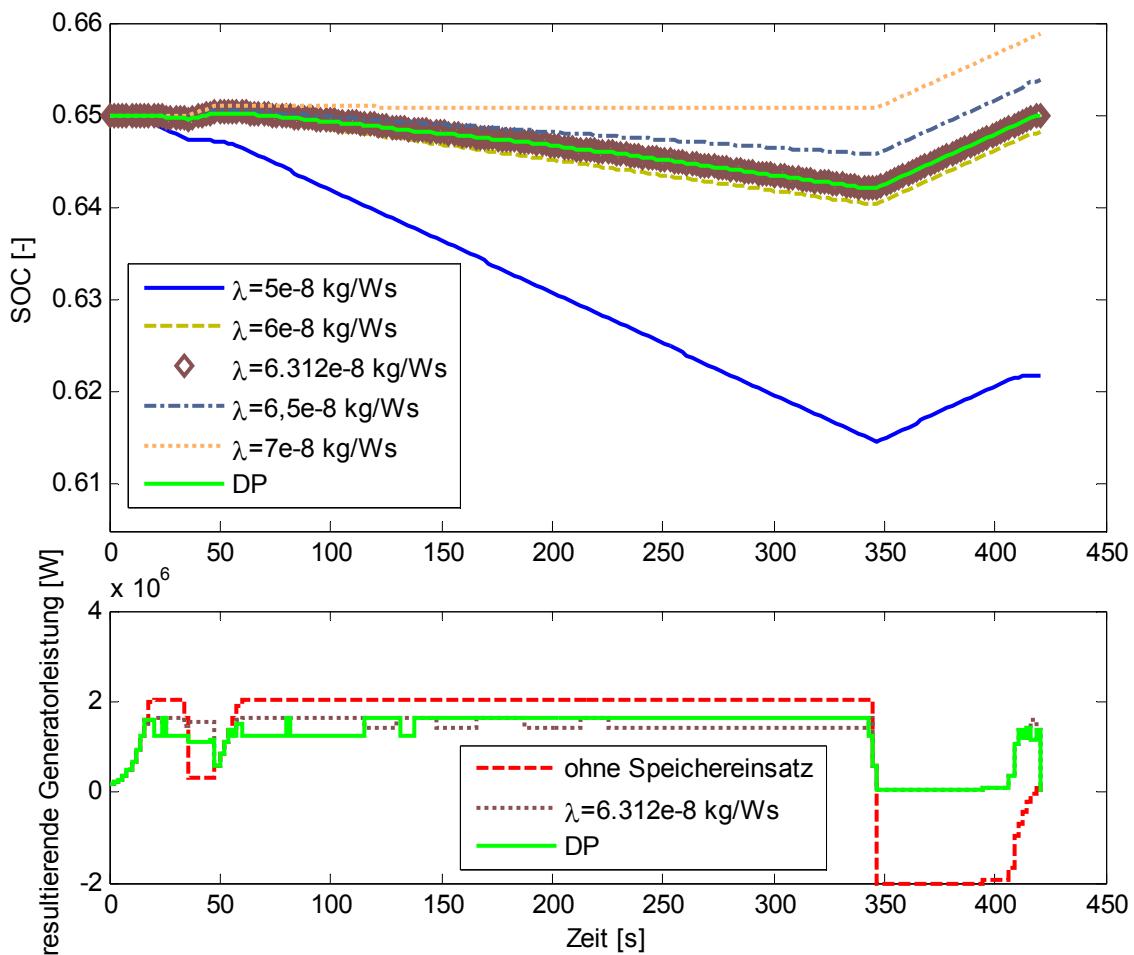


Abbildung 4-22: Verlauf des Ladezustands in Abhängigkeit von λ im Vergleich mit dem Ergebnis der dynamischen Programmierung (nahezu unbegrenzter Speicher⁵⁵)

Durch die Möglichkeit einer feineren Diskretisierung aufgrund der bei der ECMS unkritischen Rechenzeit kann der über die DP ermittelte Kraftstoffverbrauch gegebenenfalls sogar leicht unterschritten werden (Abbildung 4-23). Der äquivalente Kraftstoffverbrauch bei Ausgleich der Ladungsdifferenz $m_{K_r, \text{SOC-Ausgleich}}$ wird über $\lambda_{\text{ausgeglichen}}$ ermittelt:

⁵⁵ Die große Speichermasse führt ohne Anwendung der Boostfunktion zu einer längeren Fahrzeit.

$$m_{K_r, \text{SOC-Ausgleich}} = m_{K_r} - \lambda_{\text{ausgeglichen}} \cdot [\text{SOC}(t_E) - \text{SOC}(t_A)] \cdot E_{\text{nom}}. \quad (4.62)$$

Da jedoch bei Schienenfahrzeugen in der Regel die Ladungsgrenzen erreicht werden, soll im Weiteren der Fall von im Ladehub beschränkten Energiespeichern diskutiert werden.

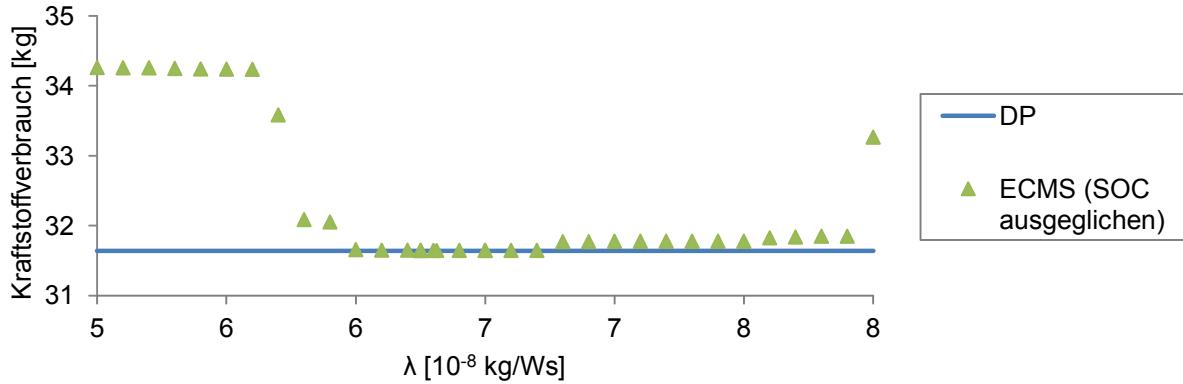


Abbildung 4-23: Kraftstoffverbrauch der ECMS in Abhängigkeit von λ im Vergleich mit der dynamischen Programmierung (nahezu unbegrenzter Speicherinhalt)

Begrenzter Speicherinhalt

Bei Betrachtung der Ergebnisse der ECMS für einen begrenzten Speicherinhalt wird eine Optimalitätsbedingung der ECMS verletzt. Es kann nun nicht zu jedem Zeitpunkt eine entsprechende Ladung oder Entladung erfolgen. Eine Beispielrechnung erfolgt für einen High-Power-Li-Ionen-Speicher mit 200 kWh Nennenergie. Die resultierenden Verläufe des Ladezustands in Abhängigkeit vom Äquivalenzkostenfaktor sind in Abbildung 4-24 dargestellt. Es fällt auf, dass anders als beim unbegrenzten Speicherinhalt durch die energetisch günstige Rekuperationsmöglichkeit gegen Ende des Lastspiels für alle sinnvollen Äquivalenzkostenfaktoren ein Ladezustand nahe am maximalen SOC erreicht wird. Die notwendigen Äquivalenzkostenfaktoren für einen Ladezustandsverlauf ähnlich dem der dynamischen Programmierung variieren für den Lade- und Entladezyklus. Ein für die Entladung günstiger Äquivalenzkostenfaktor von $6,13 \cdot 10^{-8}$ kg/Ws führt zu einer Ladung des Energiespeichers in der Konstantfahrphase, sodass in der nachfolgenden Rekuperationsphase kein Ladehub mehr für die Speicherladung verfügbar ist. Ein Äquivalenzkostenfaktor, der die Ladung des Energiespeichers in der Rekuperationsphase zur Folge hat, führt jedoch zu einer sehr schnellen Energieabgabe in Traktionsphasen (z. B. Kurve $\lambda=3 \cdot 10^{-8}$ kg/Ws).

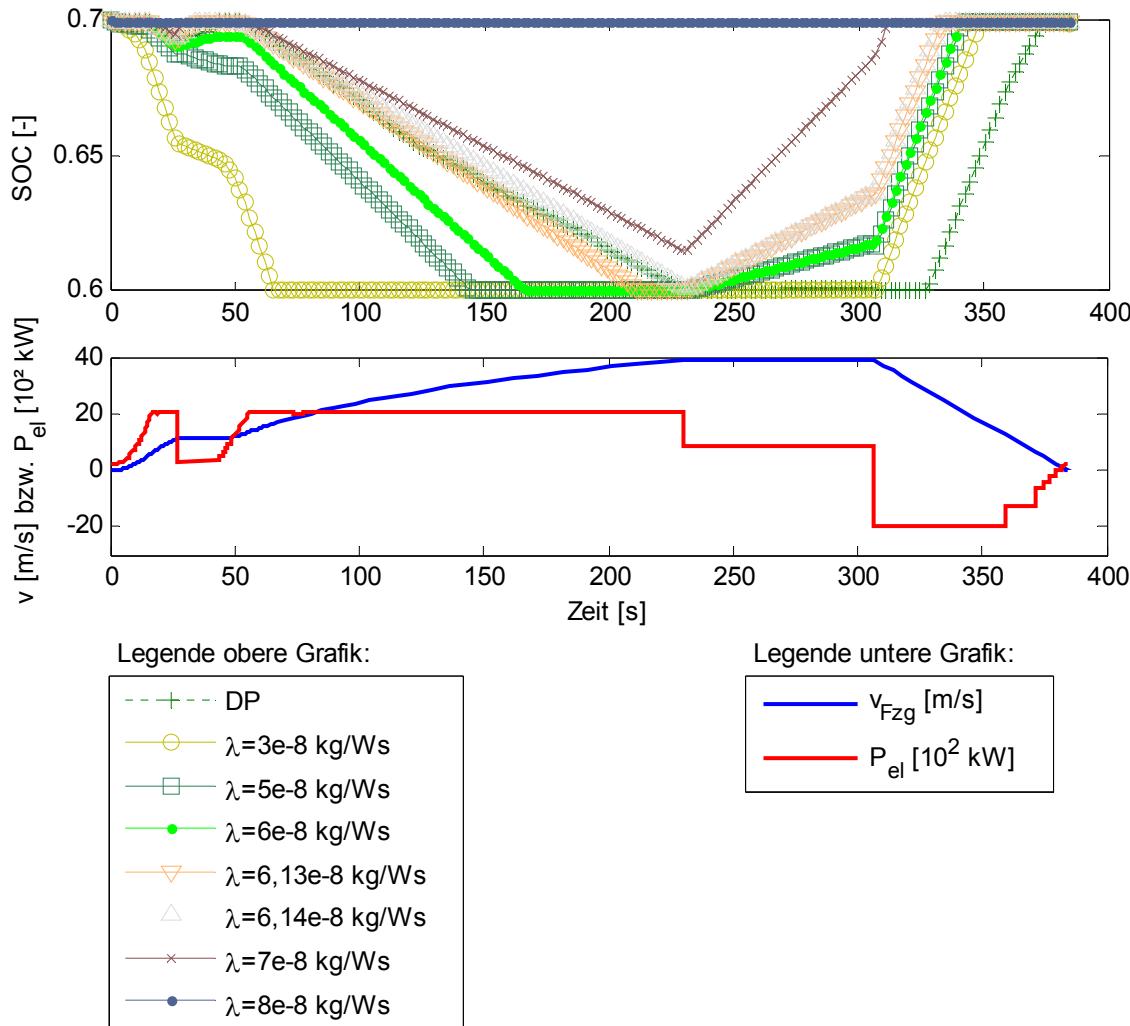


Abbildung 4-24: Ergebnis der ECMS mit konstantem Äquivalenzkostenfaktor λ (oben), unten: Fahrprofil repräsentiert durch Fahrgeschwindigkeit und elektrische Zwischenkreisleistung bei flacher Strecke (unten)

Entsprechend des Äquivalenzkostenfaktors ergibt sich nun der Kraftstoffverbrauch der ECMS (Abbildung 4-25). Wie postuliert wurde, wird der aus der DP gewonnene optimale Verlauf des Ladestands für keinen der Faktoren erreicht werden. Neben dem globalen Minimum ergibt sich ein weiteres Minimum, welches in der effizienten Nutzung der Lastpunktverschiebung bei dem Geschwindigkeitsplateau zu Beginn des Fahrspiels begründet ist. Charakteristisch ist der steile Anstieg des Kraftstoffverbrauchs für große Äquivalenzkostenfaktoren, der aus der Ladung des Speichers über die Lastpunktanhebung anstelle der Nutzung der Rekuperationsarbeit herröhrt. Das Ergebnis macht deutlich, dass die Applikation von konstanten Äquivalenzkostenfaktoren damit für diesel-elektrische Lokomotiven im Zugverband keine Lösung darstellt.

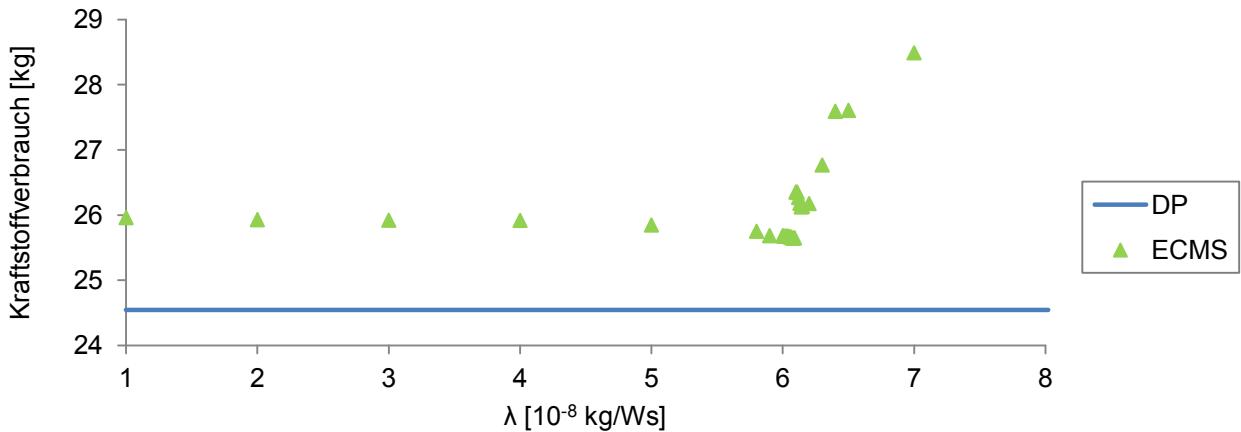


Abbildung 4-25: Kraftstoffverbrauch der ECMS in Abhängigkeit von λ im Vergleich mit der dynamischen Programmierung (begrenzter Speicher)

Anpassung der Äquivalenzkostenfaktoren über die vorausschauende Fahrweise

Im Folgenden soll untersucht werden, ob die Äquivalenzkostenfaktoren über die in der DP berechnete vorausschauende Fahrweise angepasst werden können. Ein ähnliches Vorgehen wurde in [KB11] für den unrestringierten Speicherinhalt angewendet. Das Ergebnis der dynamischen Programmierung ist die Trajektorie des Kraftstoffverbrauchs bei optimaler Steuerung in Abhängigkeit von Zeitpunkt und Ladezustand. Unter Berücksichtigung der Gleichungen (4.45) und (4.46) kann durch Differenzbildung über der Energie die korrespondierende Äquivalenzkostenmatrix gefunden werden:

$$\lambda(\text{SOC}, t) = -\frac{\Delta m_{Kr}}{\Delta \text{SOC} \cdot E_{\text{nom}}} = -\frac{\Delta m_{Kr}}{\Delta E_{\text{BAT},i}}. \quad (4.63)$$

In Abbildung 4-26 ist die berechnete Äquivalenzkostenmatrix grafisch veranschaulicht. Dabei bilden die Isolinien die Ladezustandsverläufe bei konstantem Äquivalenzkostenfaktor ab. Wird der Äquivalenzkostenfaktor nicht analog zum dargestellten gewählt, wird die Isolinie verlassen. Auffallend ist dabei erneut, dass die Isolinien auf die SOC-Begrenzung treffen. Daran erkennt man, dass in der optimalen Trajektorie konstante Äquivalenzkostenfaktor nur abschnittsweise gültig sind. Der große Bereich mit Äquivalenzkostenfaktor Null zeigt an, dass an diesem Abschnitt eine Ladung ohne Einbußen in der Kraftstoffbilanz (Rekuperationsmöglichkeit) möglich ist.

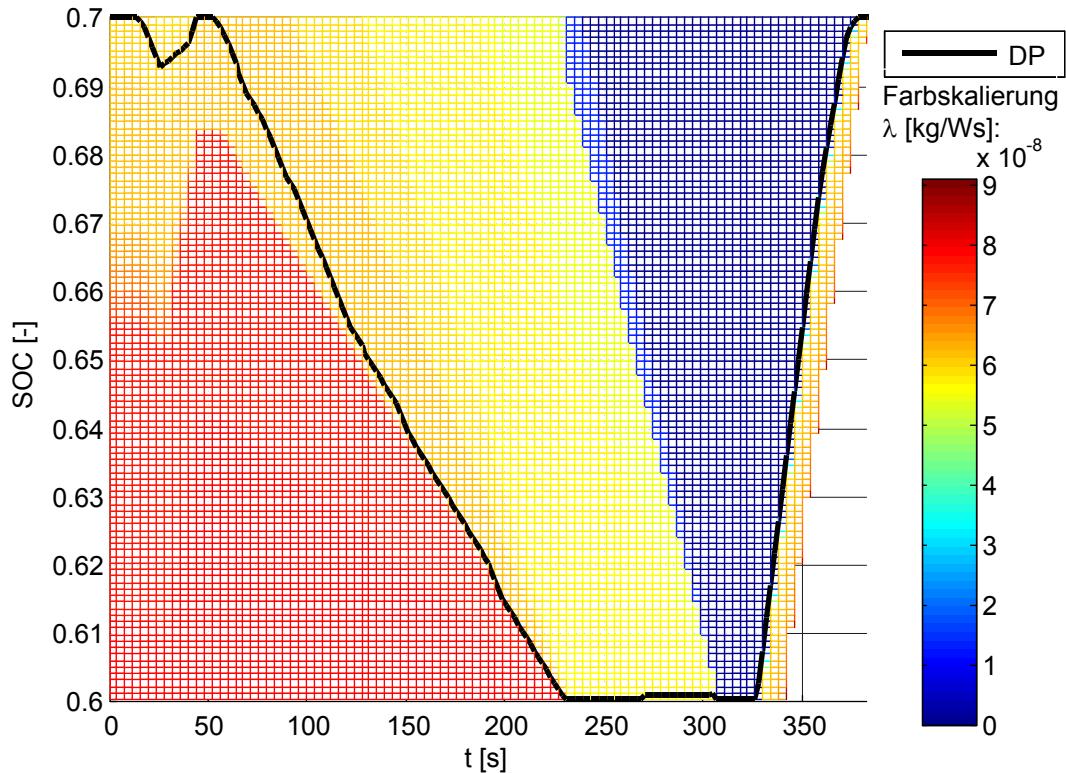


Abbildung 4-26: Äquivalenzkostenmatrix mit Verlauf der optimalen Fahrtrajektorie ($SOC(t_A)=SOC(t_E)=0,7$)

Der Äquivalenzkostenfaktor gewonnen aus der optimalen Trajektorie der dynamischen Programmierung und der Speicherverlauf nach dessen Anwendung in der ECMS sind in Abbildung 4-27 dargestellt. Man erkennt die gute Übereinstimmung der Trajektorien. Die resultierende Abweichung im Kraftstoffverbrauch liegt unter Berücksichtigung des geringfügig abweichenden Entladezustands bei unter einem Promille. Damit kann die Anwendung der Methode als verifiziert betrachtet werden.

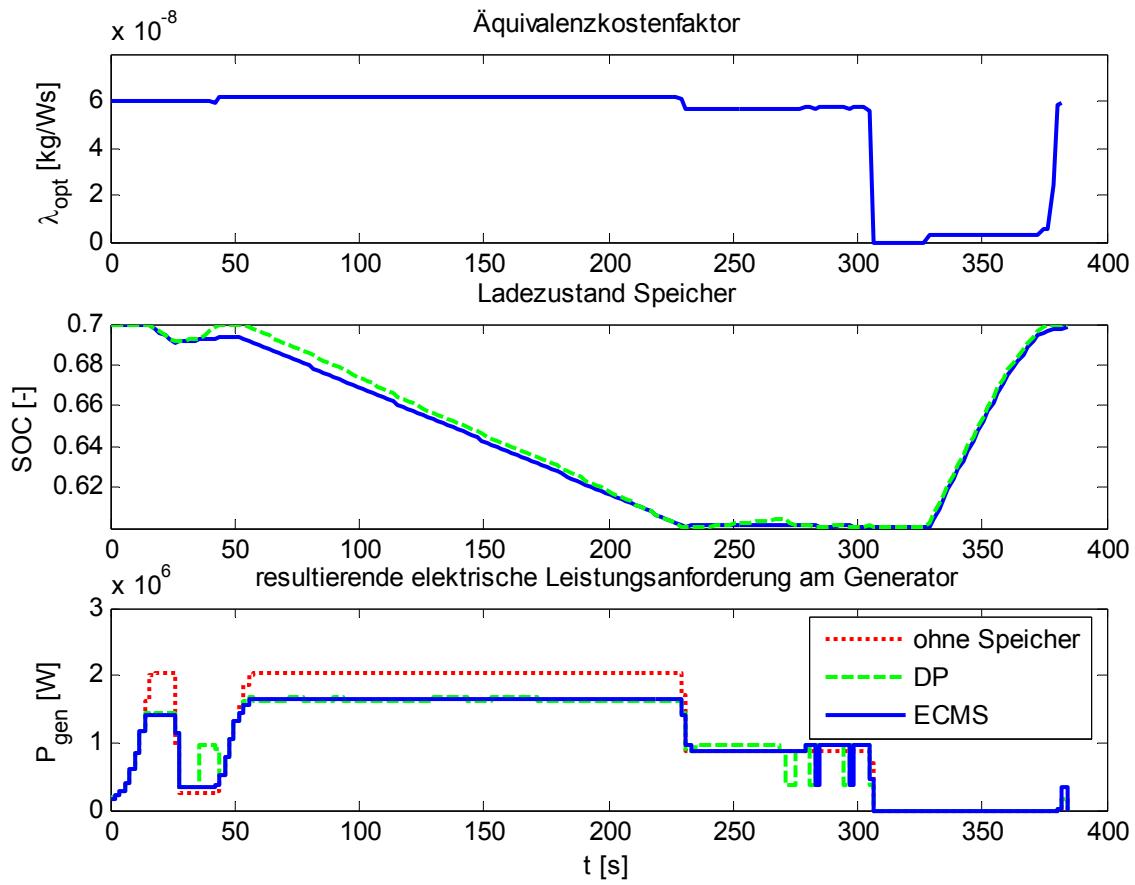


Abbildung 4-27: Äquivalenzkostenfaktor der optimalen vorausschauenden Betriebsstrategie über der Zeit und resultierender Betriebsverlauf des Speichers

4.4.7 Vergleichende Betrachtung

Im Folgenden sollen die vorgestellten Speicherstrategien hinsichtlich der Kriterien Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch, Energiedurchsatz und Umsetzbarkeit verglichen und zusammenhängend bewertet werden.

Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch

Die ausgewählte Energiespeicherkonfiguration und Strecke sollen beispielhaft die Potentiale und Grenzen der Methode der vorausschauenden Speicherstrategien aufzeigen. Eine Energieeinsparung von über zehn Prozent ist für die angegebene Zugkonfiguration ein realistischer Wert (Tabelle 4-3). HP-Li-Ionen-Speicher und Doppelschichtkondensator sind in der Lage, den zur Verfügung stehenden Speicherinhalt in der Rekuperationsphase für die Ladung zu nutzen, daher sind deren Werte für die Energieeinsparung in der gleichen Größenordnung. Die etwas höhere Energieeinsparung des HP-Li-Ionen-Speichers ist in der niedrigeren Speichermasse begründet, welche sich positiv auf den Kraftstoffverbrauch auswirkt. Der HE-Li-Ionen-Speicher hat eine niedrigere mögliche Einsparung. Da der Vergleich auf einem gleichen Nennenergieinhalt beruht, darf das schlechte Abschneiden jedoch nicht überbewertet werden. Massebezogen liegt die Einsparung in etwa in der Größenordnung des Doppelschichtkondensators.

Hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs für die untersuchte Strecke können in Abhängigkeit von der Wahl der Betriebsstrategie des Speichers erhebliche Unterschiede in der Kraftstoffeinsparung festgestellt werden. Gegenüber einer einfachen Rekuperationsstrategie (siehe Abschnitt 4.4.4) kann die Energieeinsparung um über vier Prozentpunkte gesteigert werden (Abbildung 4-28). Die vorausschauende Anpassung der Entladeleistung bei der Rekuperationsenergie macht den Hauptteil des Optimierungspotentials aus. Somit kann die angepasste Entladeleistung bereits einen Großteil des Optimierungspotentials ausnutzen. Der verbleibende Optimierungsspielraum liegt beim Doppel-schichtkondensator und der HE-Li-Ionen-Batterie bei nur ca. 0,3 Prozent. Im Fall der HE-Li-Ionen-Batterie ergibt sich die größere Differenz aus der Nutzung einer Lastpunktanhebung in der Konstantfahrphase, die über die Rekuperationsstrategie nicht abgebildet werden kann.

Tabelle 4-3: Verbrauchseinsparung bei verschiedenen Speichertypen und Betriebsstrategien (flache Strecke, 10 km, ein Halt, 20 kWh Nutzenergie)

	DSK	HE-Li-Ionen-Batterie	HP-Li-Ionen-Batterie
Speichermasse [kg]	11607,00	2941,00	5873,00
Kraftstoffverbrauch [kg]			
Rekuperation (regelbasiert)	26,51	28,92	25,89
Rekuperation (regelbasiert, angepasste Leistung)	25,32	28,71	24,67
ECMS (λ konstant)	26,33	28,31	26,13
ECMS (λ prädiziert aus DP)	25,42	28,26	24,64
vollständige Prädiktion (DP)	25,17	28,26	24,55

Für die ECMS mit konstantem λ bestätigt sich die in Abschnitt 4.4.6 getroffene Aussage, dass diese für den vorliegenden Betriebsfall aufgrund der beschränkten Ladungsmenge nicht geeignet ist. Für den HE-Li-Ionen-Speicher trifft die Annahme des unrestringierten Speichereinsatzes zu, da mit den zulässigen Leistungsgrenzen des HE-Li-Ionen-Speichers bei der vorliegenden Bremsung die Ladungsgrenzen nicht erreicht werden. Die ECMS mit einem λ -Verlauf gewonnen aus der DP kann die Werte der vollständigen Prädiktion über die DP annähernd erreichen.

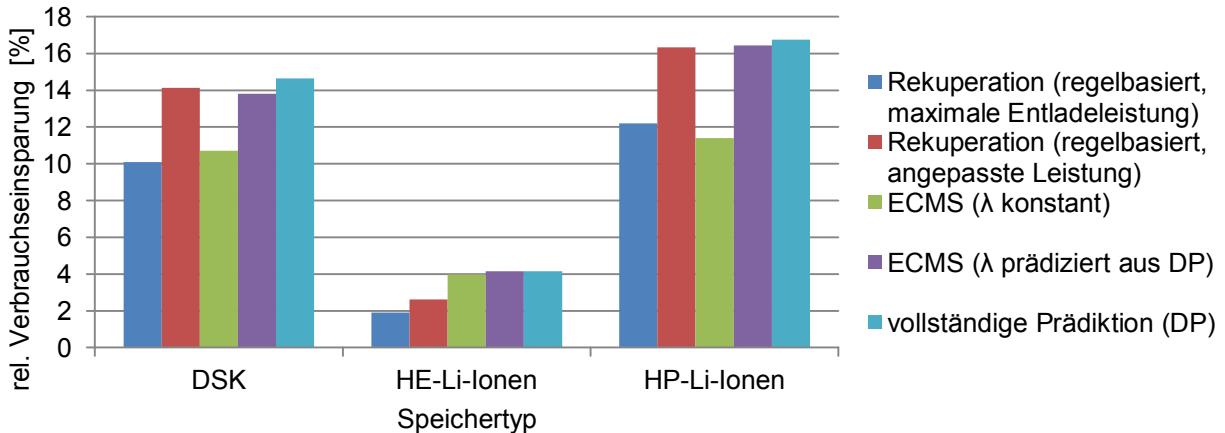


Abbildung 4-28: Relative Verbrauchseinsparung bei verschiedenen Betriebsstrategien (flache Strecke, Länge 10 km, ein Halt, Nutzenergie 20 kWh)

Energieumsatz im Speicher

Der Energiedurchsatz in Abhängigkeit der Betriebsstrategie kann als Maß für den Speicherverschleiß angesehen werden. Dies ist bei Batterien möglich, da unter der bei Batterien angewendeten Annahme einer im Betriebsbereich konstanten Spannung der Energiedurchsatz proportional zum Ladungsdurchsatz ist. Betriebsstrategien, die nur die Rekuperationsenergie nutzen, haben naturgemäß einen relativ geringen Ladungsumsatz. Bei einer angepassten Entladeleistung steigt trotz des gesenkten Kraftstoffverbrauchs der Energiedurchsatz nicht an. Im Gegenteil nimmt durch die geringeren Entladeströme die Speicherbelastung aufgrund der geringeren Verlustleistung sogar ab. Durch Einsatz der DP kommen Phasen der Lastanpassung durch den Energiespeicher dazu. Dies führt zu einem Anstieg des Energiedurchsatzes um ca. zehn Prozent beim Doppelschichtkondensator und ca. 15 Prozent bei der HP-Li-Ionen-Batterie. Der beim HE-Li-Ionen-Speicher um 136 Prozent gesteigerte Energiedurchsatz weist auf die geringere Bedeutung der Rekuperation im Vergleich zur Lastpunktanpassung hin. Der Energiedurchsatz steigt dabei überproportional im Vergleich zu der erreichten Steigerung der Kraftstoffeinsparung von 92 Prozent.

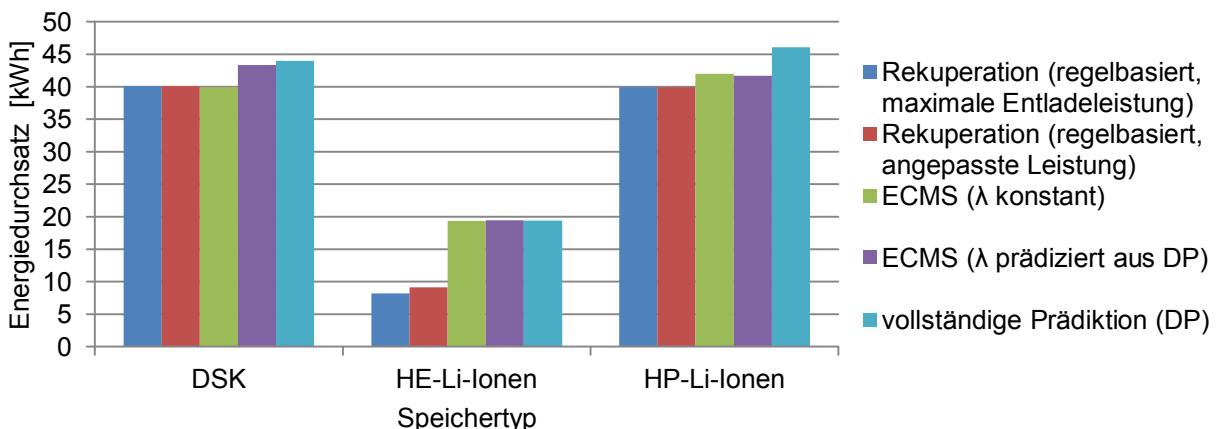


Abbildung 4-29: Energiedurchsatz bei verschiedenen Speichertypen und Betriebsstrategien (flache Strecke, Länge 10 km, ein Halt, Nutzenergie 20 kWh)

Anwendbarkeit der Betriebsstrategien

Im Folgenden soll ein Eignungsnachweis der Betriebsstrategien unter der Maßgabe einer Prädiktionsmöglichkeit erbracht und kurz auf die Möglichkeit der Umsetzung eingegangen werden. Es wird bei den Betrachtungen davon ausgegangen, dass die Speichersteuerung Zugriff auf die Informationen über den aktuellen Streckenpunkt (z. B. über das GPS) hat und eine Fahrempfehlung durch ein Fahrerassistenzsystem (siehe auch Abschnitt 4.3.2) erfolgt.

Regelbasierte Strategien berücksichtigen nur den aktuellen Fahrzeugzustand und sind damit robust gegen Veränderungen im Fahrtverlauf. Werden die Regeln jedoch auf bestimmte Fahrzyklen hin optimiert, wie bei der Anpassung der Entladeleistung erfolgt, können diese Strategien sich bei anderen Fahrzyklen oder Fahrerprofilen als ungünstig erweisen. Eine Einstellung der Entladerate in Abhängigkeit vom davorliegenden Streckenabschnitt nach Vorberechnungen erscheint jedoch unproblematisch und ist in der Fahrzeugsteuerung berechenbar.

Für die Anwendbarkeit der ECMS wird auch auf die aktuelle Leistungsinformation der Verbraucher im Zwischenkreis zurückgegriffen, wie sie in der Fahrzeugsteuerung vorliegt. Bei Anwendung eines HE-Li-Ionen-Speichers ist die Applikation eines konstanten Äquivalenzkostenfaktors möglich. Dieser könnte in Vorberechnungen auf Basis von Streckentypen mit bestimmten Eigenschaften definiert werden. Dabei wird in der Praxis eine langfristige Drift des Ladungszustands auftreten. Diese kann jedoch bei Überschreitung bestimmter Ladungsgrenzen durch eine mögliche Anpassung des Äquivalenzkostenfaktors ausgeglichen werden. Bei Speicherkonfigurationen, in denen ein ständiger Betrieb zwischen den Ladungsgrenzen auftritt (z. B. bei Doppelschichtkondensatoren oder HP-Li-Ionen-Speichern) ist das Hinterlegen eines ortsabhängigen Äquivalenzkostenfaktors möglich. Durch den Bezug auf die innere Speicherleistung als Bilanzgröße sind in der Kostenbilanz die Wirkungsgradverluste des Speichers und der Leistungselektronik abgedeckt.

Die Berechnungszeiten von bis zu einer Minute für einen Streckenabschnitt⁵⁶ machen die dynamische Programmierung in der Anwendung zur Generierung eines zeitabhängigen Sollleistungsverlaufs anfällig für Abweichungen im prädictierten Lastverlauf. Diese können durch Abweichungen vom Sollfahrtverlauf bzw. bei Änderung von energierelevanten Zugparametern wie Fahrwiderständen, der Beladung oder der Zugsammelschienenleistung auftreten. Anders als bei Variationen in der Zustandgröße SOC muss hierbei eine Neuberechnung der kompletten Fahrt erfolgen, was während der Fahrt nicht möglich ist. Eine Möglichkeit, die Methodik robuster gegenüber Schwankungen zu machen, ist die Generierung eines Soll-Ladezustandsprofils in Abhängigkeit von dem Streckenpunkt, welches während der Fahrt mit dem aktuellen SOC abgeglichen wird. Aus der Abweichung kann über einen Regler unter Einhaltung der Leistungsgrenzen des Speichers die Speicherleistung gestellt werden. Dieses Verfahren soll im Folgenden kurz auf seine Anwendbarkeit hin überprüft werden.

⁵⁶ Randbedingungen: Zeitschrittweite fünf Sekunden, mindestens fünf mögliche Lade- und zwanzig mögliche Entladeschritte pro Zeitschritt

Die Generierung eines, gegenüber dem für die Prädiktion genutzten Fahrspiel (schnellste Fahrt), gestörten Fahrtverlaufs erfolgte über die Anwendung des Ausrollens als einfache Energiesparstrategie mit den dargestellten Fahrtzeitverlängerungen (Abbildung 4-30). Die Veränderungen sowohl bei den auftretenden Lastpunkten als auch in der Fahrtzeit sind dabei signifikant.

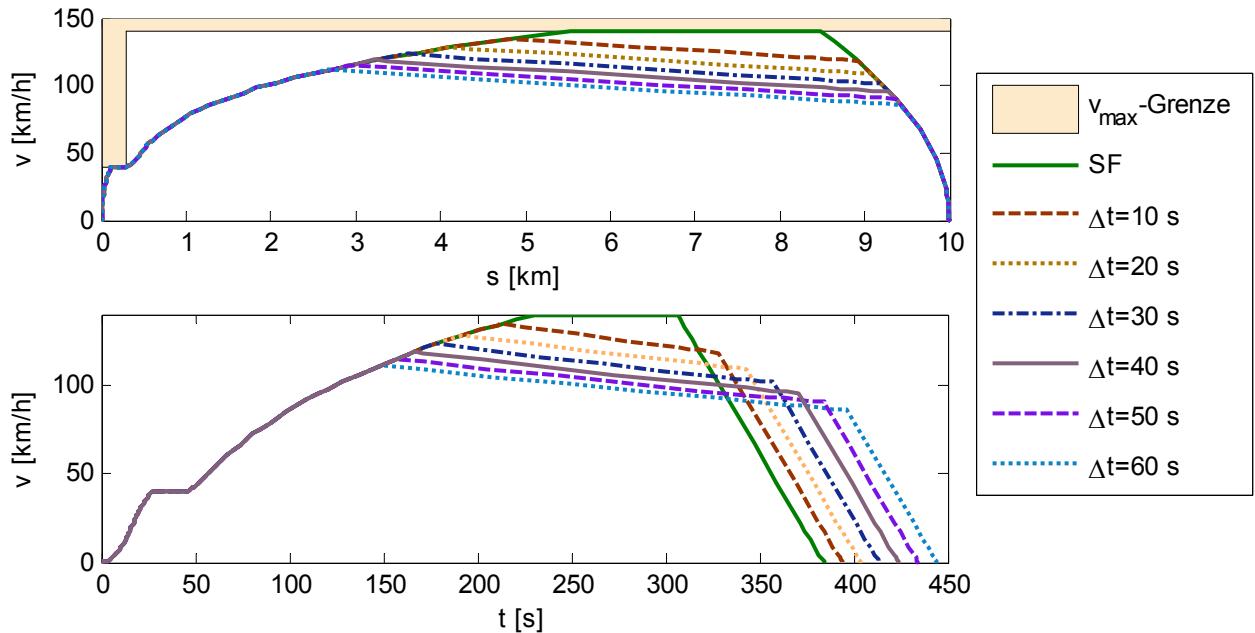


Abbildung 4-30: Variation der Fahrzeit (Ausrollen mit Fahrtzeitverlängerung)

Das Ergebnis des an der schnellen Fahrt optimierten Sollverlaufs des Ladezustands wird mit dem Ergebnis der optimalen Fahrweise für das neue Fahrspiel und der einfachen Rekuperationsstrategie verglichen. In Abbildung 4-31 wird der relative Kraftstoffverbrauch gegenüber der dynamischen Programmierung dargestellt. Es zeigt sich, dass in diesem Fall für geringe Abweichungen die ortsbezogene DP gute Verbrauchswerte erreicht. Die erzielte Einsparung nimmt erst bei größeren Veränderungen ab. Ursache ist in diesem Fall die Entladung des Speichers in den Bereich des Fahrzustands Ausrollen hinein, welche eine geringere Effizienz aufweist (Abbildung 4-32). Der negative Effekt auf den Verbrauch kann über eine Begrenzung der Entladung auf die derzeitige Leistungsanforderung limitiert werden.

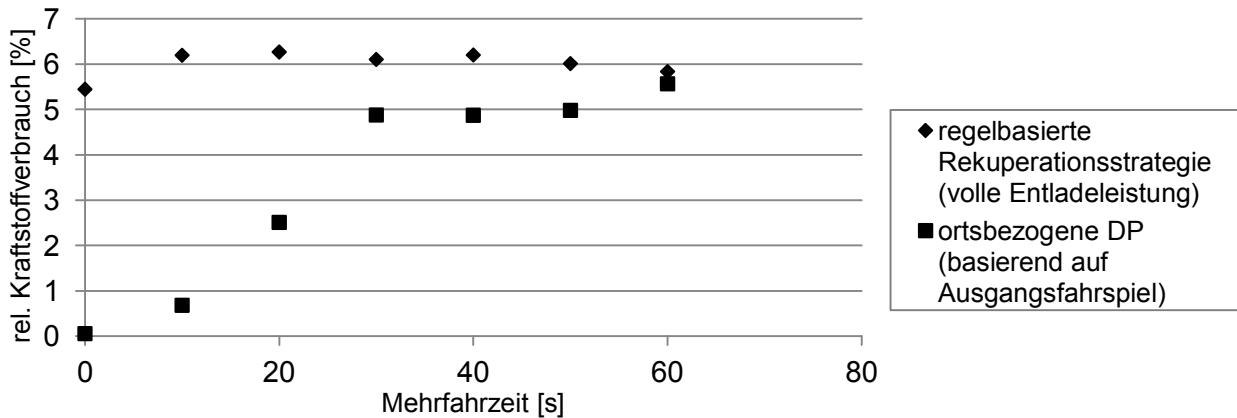


Abbildung 4-31: Kraftstoffverbrauch einer einfachen Rekuperationsstrategie (volle Entladeleistung) und der ortsbasierten Prädiktion basierend auf dem Ausgangsfahrspiel in Relation zu einer vollständigen Prädiktion des aktuellen Fahrspiels für unterschiedliche Fahrtverläufe

Bei einer zu großen Abweichung der Fahrspiele kann als Ausweg der Rückfall in eine regelbasierte Strategie erfolgen. Diese kann so lange die Steuerung übernehmen, bis der Fahrtabschnitt beendet ist oder das Berechnungsergebnis für eine neue dynamische Programmierung vorliegt. Vor einer Umsetzung der Strategien auf dem Fahrzeug muss die Auswirkung von Fahrtabweichungen tiefergehend untersucht werden. Es sind detaillierte Strategien zu entwickeln, die mit Hilfe der Simulation und Fahrzeugtests untersucht zu überprüfen sind. Dies ist für die Sicherstellung des Einhalts der vorhergesagten Kraftstoffverbräuche notwendig.

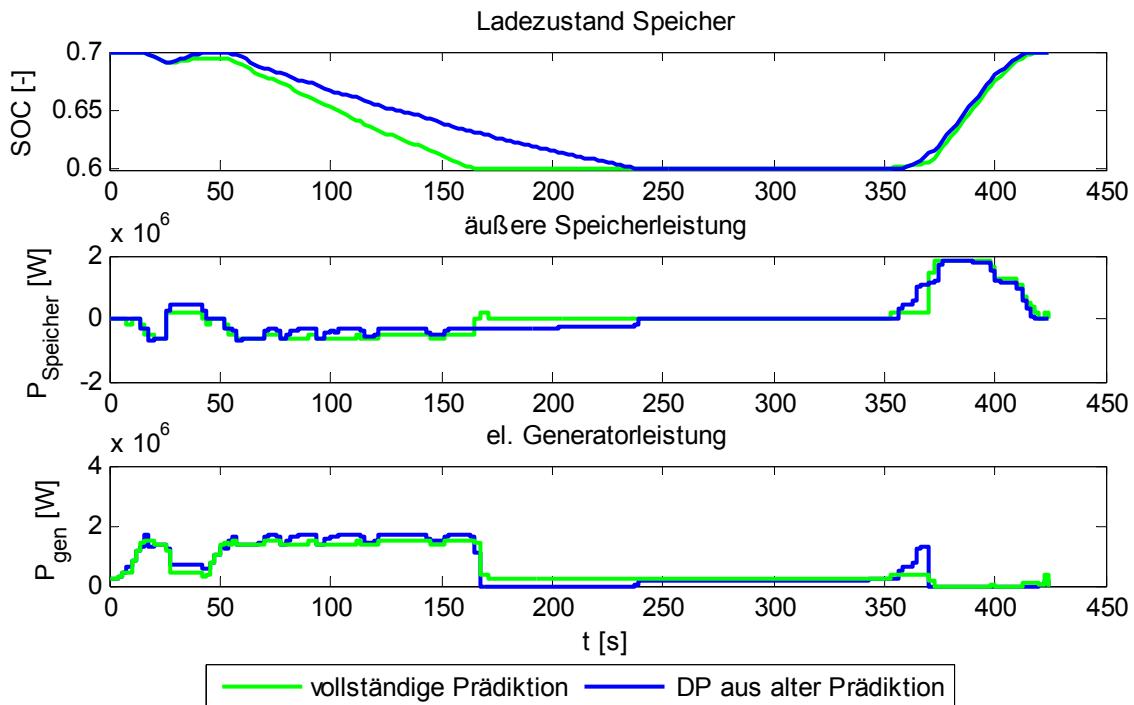


Abbildung 4-32: Darstellung des Speicherladezustands und der Speicherverläufe bei einer Mehrfahrzeit von 40 s

4.4.8 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden verschiedene Betriebsstrategien für Energiespeicher vorgestellt und mit Hilfe des Verbrauchsberechnungsprogramms auf Basis quasistatischer Betrachtungen für ausgewählte Speicherkonfigurationen getestet. Dabei wurde festgestellt, dass die Anwendung einer Fahrtverlaufsprädiktion die Effizienz des Speichereinsatzes signifikant steigern kann. Diese ist jedoch an Bedingungen wie den automatischen Fahrzeugbetrieb bzw. die Vorgabe eines Fahrtverlaufs über die Fahrempfehlung und ein Ortungssystem auf dem Fahrzeug geknüpft.

Generell ist die Kraftstoffeinsparung des Energiespeichersystems an Mechanismen, wie z. B. die Rekuperation von elektrischer Rekuperationsarbeit beim Bremsen oder eine Lastpunktanpassung, gebunden. Die Rekuperation weist dabei eine wesentlich höhere Energieeinsparung pro Energieumsatz im Speicher auf und ist auch aus Kostengesichtspunkten uneingeschränkt empfehlenswert. Die Lastpunktanhebung kann durchaus einen Einsparungseffekt hervorrufen. Ob sie sich aus kommerzieller Sicht lohnt, muss auf Basis der Kosten für den Energiespeicher und der prognostizierten Lebensdauer entschieden werden. Diese können über den Energieumsatz am Energiespeicher auch in die Optimierung eingebunden werden. Das Betriebsziel Leistungssteigerung des Fahrzeugs über den Energiespeicher kann eine Fahrtzeiteinsparung bringen. Ohne Prädiktion ist jedoch gegebenenfalls das Vorhalten einer Ladungsreserve im Speicher nötig, welche der vollständigen Ausnutzung des Ladungshubs in der nächsten Rekuperationsphase entgegensteht. Hier kann eine optimale Betriebsstrategie bei vollständiger Prädiktion eine stärkere Berücksichtigung des Betriebsziels Kraftstoffeinsparung herbeiführen.

Die effiziente Nutzung der rückgewonnenen Energie kann durch eine angepasste Entladung unter Berücksichtigung des Motorarbeitspunktes und des Speicherwirkungsgrades, welcher bei steigendem Entladestrom abnimmt, erfolgen. Während die Rekuperation über regelbasierte Strategien gut abgebildet wird, ist eine Berücksichtigung der Motorlastpunkte nur effizient mit der ECMS bzw. der DP möglich. Die ECMS stellt eine optimale und über nur einen Parameter einfach zu implementierende Betriebsstrategie dar, welche ohne komplette Prädiktion der Strecke eingesetzt werden kann. Bei der Wahl eines konstanten Äquivalenzkostenfaktors ist die Methode jedoch nur bezogen auf eine Rekuperationsphase oder hinreichend große Energiespeicher optimal.

Für den häufigeren Fall des beschränkten Ladungshubs können die ECMS mit variablem Äquivalenzkostenfaktor bzw. direkt die dynamische Programmierung eingesetzt werden. Die Effizienz konnte für beide Verfahren nachgewiesen werden. Die Bedingungen der möglichen Prädiktion des Fahrtverlaufs gerade im Zusammenspiel mit Fahrerassistenzsystemen machen den Einsatz solcher Verfahren in der Bahntechnik möglich. Die installierten Energiespeicher können mit diesen Methoden im Sinne einer Kraftstoffeinsparung effizienter betrieben werden. Weitere wesentliche Merkmale sind in einer Übersicht in Tabelle 4-4 dargestellt.

In den Untersuchungen fällt auf, dass die Rekuperationsphasen der schnellsten Fahrt für HE-Li-Ionen-Speicher nicht ausreichen. Da zum heutigen Zeitpunkt unklar ist, ob leistungsfähige und bezahlbare HP-Li-Ionen-Speicher mit hohen Laderaten zum Aufbau großer Energiespeicher in

naher Zukunft zur Verfügung stehen, soll im nachfolgenden Abschnitt der Speichereinsatz in Kombination mit der energiesparenden Fahrweise getestet werden.

Tabelle 4-4: Übersicht über Betriebsstrategien und deren Merkmale

	1) Regelbasier-te Strategien (ohne Prädik-tion)	2) Regelbasier-te Strategien mit angepas-senen Parametern	3) ECMS – λ konstant	4) ECMS – λ prädiziert	5) DP
Kalibrierungsauf-wand	Definition und Kalibrierung u. U. vieler Schaltbedingun-gen und Para-meter	wie 1), zusätz-lich Kalibrierung bestimmter Parameter durch Prädiktion	Stellung eines Parameters (aus DP-Ergebnis)	Übernahme des prädizier-ten λ -Verlaufs aus DP-Ergebnis	direktes Er-gebnis nach Anwendung der DP
Notwendiger Grad der Prädik-tion	keine	ggf. unvollstän-dig Informatio-nen ausreichend (z. B. Haltestel-lenabstand)	ggf. unvollstän-dig Informatio-nen ausreichend (z. B. Strecken-typ)	vollständige Prädiktion notwendig	vollständige Prädiktion notwendig
Implementierung in Praxis	direkte Anwen-dung	Prädiktion im Vorfeld, direkte Anwendung	Prädiktion im Vorfeld, direkte Anwendung	Prädiktion im Vorfeld, weg-basierte Vor-gabe von λ	Prädiktion im Vorfeld, weg-basierte Vor-gabe des SOC
Übertragbarkeit der Methode	in der Regel aufwändig (Be-achtung Fahr-zeugparameter)	in der Regel aufwändig (Be-achtung Fahr-zeugparameter)	einfach, benötigt DP	einfach, benötigt DP	einfach
Güte der Opti-mierung bei voll-ständiger Prädik-tion	suboptimal	suboptimal, aber Anpassung an Strecke	entspricht DP-Lösung (bei unbegrenztem Speicherinhalt), sonst schlecht	entspricht DP-Lösung	optimal (Ein-schränkung: Diskretisie-rung)
Einsatzbereich	Energieeinspa-rung und Boos-ting	Energieeinspa-rung und Boos-ting	Energieeinspa-rung, Funktio-nalität nur für im Vergleich zur Rekuperation-sarbeit große Speicherenergie gewährleistet	Energieeinspa-rung und Boosting	Energieeinspa-rung und Boosting

4.5 Kopplung der Optimierungsprobleme

In den vorherigen Abschnitten wurden die Fragestellung der optimierten Fahrweise und der optimalen Speichersteuerung getrennt betrachtet. Im Folgenden sollen die Möglichkeiten einer speicheroptimalen Steuerung mit angepasster Fahrweise evaluiert werden. Aufgrund des exponentiellen Anstiegs der notwendigen Rechenschritte und der damit entstehenden für Fahrtberechnungen zu

großen Rechenzeit wurde auf eine Kopplung der Optimierungsprobleme für Fahrt- und Speicher-einsatz mit Hilfe der dynamischen Programmierung verzichtet (vergl. Abschnitt 4.3.5). Stattdessen kommt die Trajektorienoptimierung mit Hilfe der sukzessiven Approximation zum Einsatz (Abbildung 4-5). Diese kann mit allen vorgestellten Speicherstrategien gekoppelt werden. Als einfach nachvollziehende Basis wurde für die Betrachtungen ein nutzbarer Speicherinhalt von 20 kWh und eine Strecke von zehn Kilometern Länge verwendet (Abbildung 4-30).

4.5.1 Verlängerung der Rekuperationsdauer durch Nutzung der Mehrfahrzeit

Je nach typischer Ladedauer der Speichertypen, welche auch von der zugelassenen Entladetiefe abhängig ist (siehe Abschnitt 2.6.6), kann das eingeführte Fahrregime Rekuperation zur Verbesserung der Speicherausnutzung beitragen. Dies ist beispielsweise bei dem eingeführten HE-Li-Ionen-Speicher der Fall, welcher bei zehn Prozent DOD eine Ladezeit von ca. sechs Minuten aufweist (Tabelle B-2). Ein ähnliches Verhalten wäre jedoch auch bei einer hohen Ausnutzung des Ladehubs für den vorgestellten HP-Li-Ionen-Speichers denkbar. Aufgrund der hohen Ladedauern wird bei Nutzung der regelbasierten Fahroptimierung der Energerekuperation der Vorzug gegenüber dem Ausrollen gegeben, wie in Abbildung 4-33 ersichtlich wird. Bei der Fahrt ohne Speicher wurde von der sukzessiven Approximation die Rekuperation der Nebenaggregateleistung genutzt, womit sich eine geringere Verzögerung ergibt. Bei den beiden schnellen Energiespeichern wird hingegen ausgerollt (geringste Verzögerung).⁵⁷

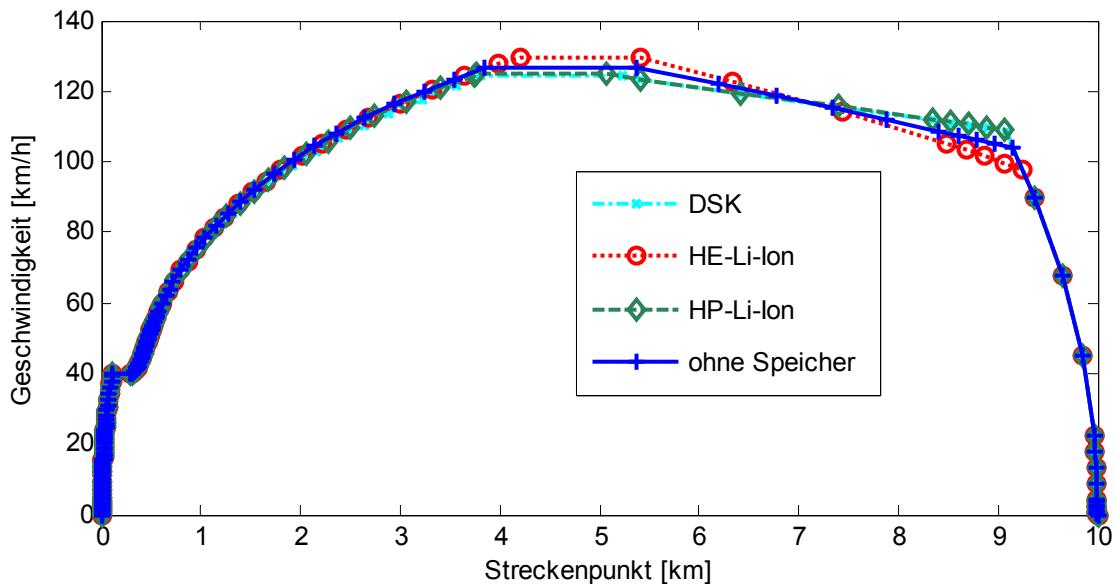


Abbildung 4-33: Entstehende Fahrschaubilder bei Nutzung der sukzessiven Approximation mit Speicherfahrzeugen (Mehrfahrzeit 20 s, entspricht ca. 5 %)

⁵⁷ Bei Speichereinsatz kann im Programm Hybrid Train Optimizer ausgewählt werden, ob stattdessen die Rekuperation mit Nebenaggregateleistung gewählt werden soll. Aus energetischer Sicht wäre dies in diesem Fall günstiger.

Das entstehende Einsparungspotential in Abhängigkeit von der Fahrzeit bei Nutzung des Fahrregimes Rekuperation ist für den HE-Li-Ionen-Speicher in Abbildung 4-34 dargestellt. Die Differenz im Kraftstoffverbrauch beträgt für den dargestellten Bereich bis zu drei Prozent.

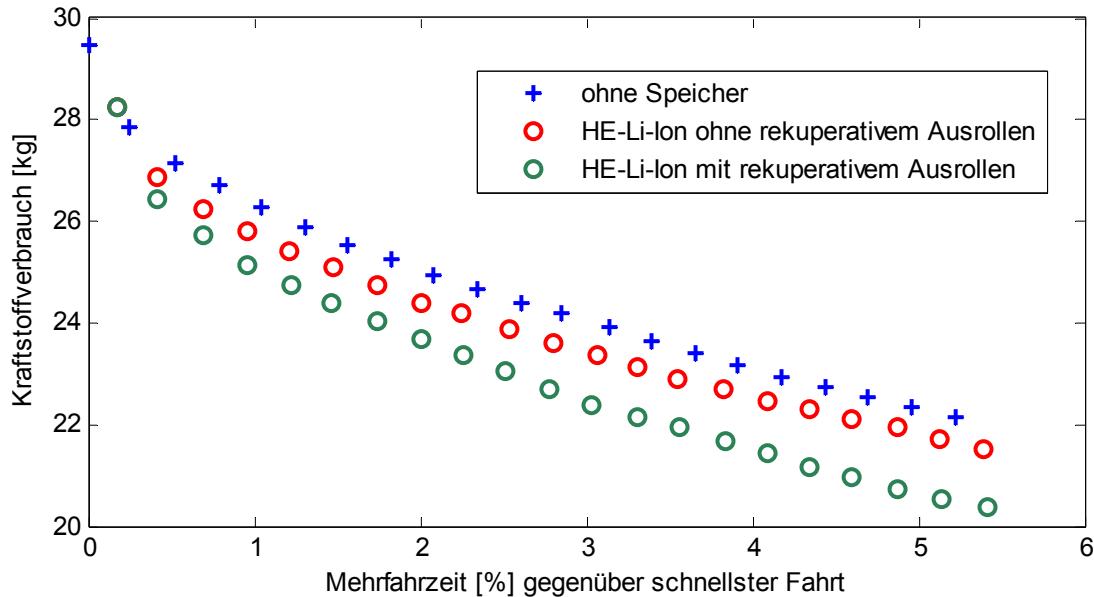


Abbildung 4-34: Vergleich des Kraftstoffverbrauchs bei Einsatz des HE-Li-Ionen-Speichers mit und ohne Einsatz des Fahrregimes Rekuperation bei verschiedener Fahrzeitreserve

4.5.2 Abhängigkeit der Kraftstoffeinsparung von der Mehrfahrzeit

In der folgenden Betrachtung wird die entstehende Verbrauchseinsparung bei Speichereinsatz ohne Boosten dargestellt. Obwohl in der Regel nur eine geringe Fahrzeitreserve nutzbar ist, soll hier zum erweiterten Verständnis der Zusammenhänge ein größerer Bereich diskutiert werden (Abbildung 4-35). Charakteristisch ist die abnehmende Einsparung pro Mehrfahrzeit mit steigender Fahrzeitreserve für alle Einsatzfälle. Bei Verwendung einer noch größeren Mehrfahrzeit wäre sogar ein Verbrauchsanstieg zu beobachten, da die Einsparung durch die geringeren Fahrwiderstände aufgrund der zunehmenden Dominanz der Nebenaggregate und schlechter Wirkungsgradbereiche überkompenziert wird. Die Verbrauchsdifferenz zwischen der Fahrt mit HP-Li-Ionen-Speicher bzw. DSK-Modul und der Fahrt ohne Speicher ist ab einer Zugabe von einem Prozent Fahrzeitreserve im Bereich bis ca. 15 Prozent Fahrzeitreserve nahezu konstant (siehe Anhang: Abbildung C-9). Im Gegensatz dazu steigt beim HE-Li-Ionen-Speicher die absolute Einsparung weiter signifikant an.

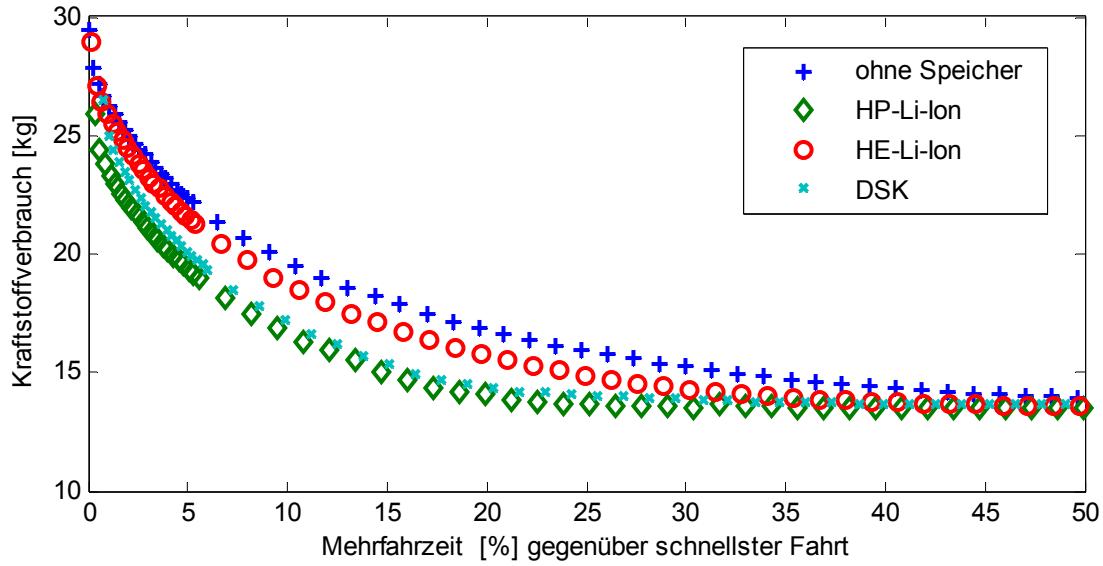


Abbildung 4-35: Kraftstoffverbrauch bei Speichereinsatz über der Fahrzeitreserve
(Speicheroptimierung über regelbasierte Rekuperationsstrategie)

Dieses Verbrauchsverhalten über den Energiedurchsatz am Energiespeicher begründet werden (Abbildung 4-36). Bei sehr großen Fahrzeitreserven nimmt das Potential des Speichereinsatzes ab, da die kinetische Energie auch für das Ausrollen genutzt werden kann und die Wirkung des Energiespeichers nicht mehr voll ausgenutzt wird. Deshalb nähert sich die mögliche Einsparung durch Speichereinsatz an das Fahrzeug ohne Speicher an.

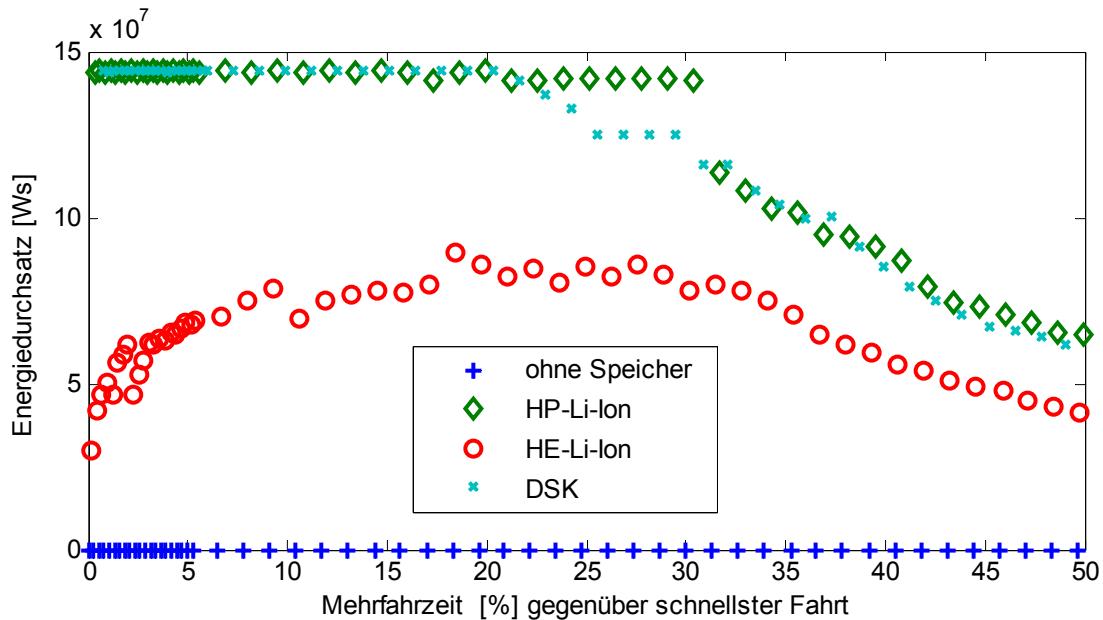


Abbildung 4-36: Energiedurchsatz der Speicher in Abhängigkeit von der Fahrzeitreserve
(Speicheroptimierung über regelbasierte Rekuperationsstrategie)

4.5.3 Auswirkung der Leistungserhöhung durch Speichereinsatz

Bisher wurde nur die Speicherstützung bei gleichbleibender Gesamtleistung betrachtet. Die Reduktion des Leistungsbedarfs bewirkt eine Verbrauchssenkung, gleichzeitig kann der Dieselmotor in einem günstigen Wirkungsgrad betrieben werden. Im Folgenden werden die Möglichkeiten der Speichernutzung zur Zugkraftsteigerung untersucht. Diese ist insbesondere bei Speichertypen mit hoher spezifischer Leistung nutzbar. Deshalb werden im Folgenden HP-Li-Ionen-Speicher und Doppelschichtkondensatoren betrachtet. Der Boostfaktor k_{boost} ist relativ zur Nennleistung des Dieselmotors formuliert. Eine Auswirkung auf die Zugkraft ergibt sich insbesondere für hohe Geschwindigkeiten, da diese in diesem Bereich durch die verfügbare Leistung bestimmt wird. Durch die höhere Beschleunigung entstehen Fahrzeitreserven, welche für die energiesparende Fahrweise genutzt werden können (Abbildung 4-37).

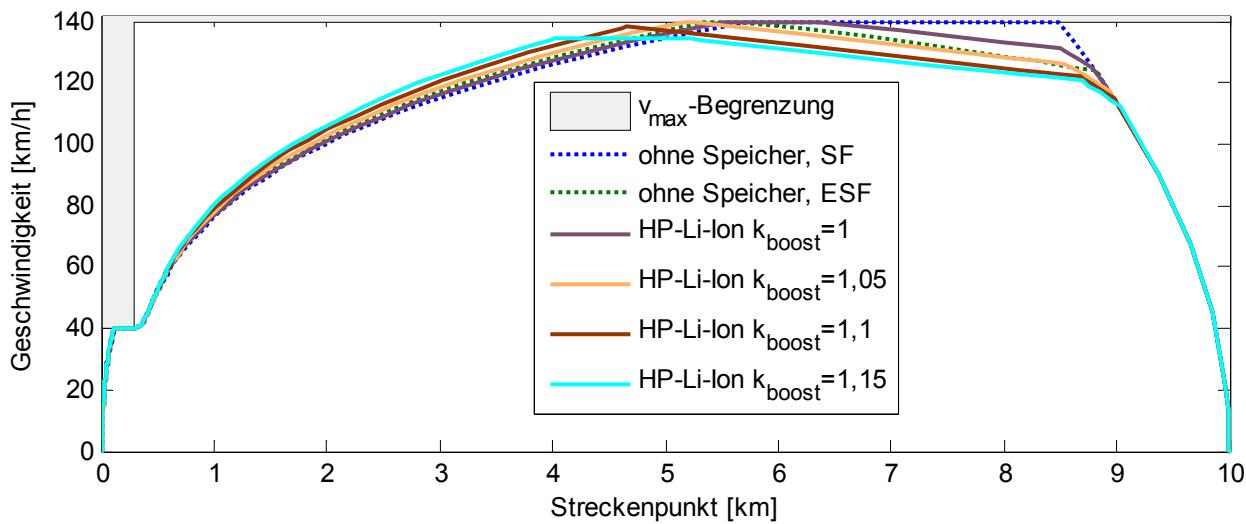


Abbildung 4-37: Fahrschaubild in Abhängigkeit vom Boostfaktor (gleiche Fahrzeit)

Es ist klar, dass durch das Boosten die möglichen Fahrzeiten verkürzt werden können. Von besonderem Interesse ist jedoch, wie sich die Motorstützung über den Arbeitsbereich des Dieselmotors hinaus auf den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs auswirkt. Ein Vergleich ist nur bei gleicher Fahrzeit sinnvoll, da die Anwendung der energieparenden Fahrweise einen großen Einfluss hat. Tatsächlich sinkt der Kraftstoffverbrauch bei steigenden bei Boostfaktoren (Abbildung 4-38). Dies gilt sowohl für HP-Li-Ionen-Batterien als auch für Doppelschichtkondensatoren. Die Einsparung beträgt über fünf Prozent für Fahrzeiten nahe der schnellsten Fahrt und nimmt bis ca. 2,5 Prozent für größere Fahrzeiten ab.

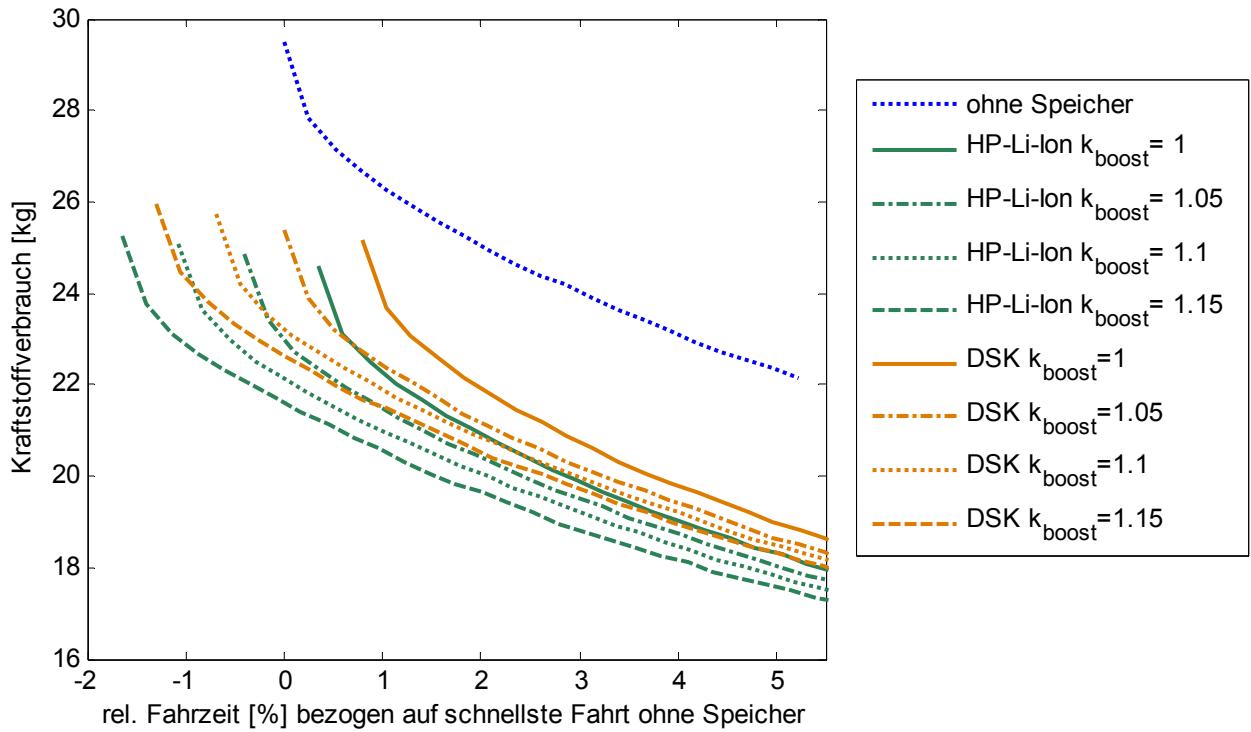


Abbildung 4-38: Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von Boostfaktor und Fahrzeit

4.5.4 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden die Betrachtungen zu Betriebsstrategien für den Einsatz von Energiespeichern mit der Optimierung der Fahrweise kombiniert. Die Anwendung dieser Algorithmen macht dabei die Untersuchung der Kraftstoffeinsparung bei Speichereinsatz für vom Betreiber vorgegebene Sollfahrzeiten erst möglich.

Insgesamt zeigt sich, dass sich die absolute Kraftstoffeinsparung bei Einsatz von Energiespeichern mit geringen Ladezeiten bei steigender nutzbarer Fahrzeitreserve kaum verändert. Erst wenn das Rekuperationspotential durch geringere Fahrgeschwindigkeiten und die Anwendung des Ausrollens so weit herabgesetzt wird, dass die speicherbare Energiemenge nicht ausgeschopft wird, sinkt die Einsparung. Für Speicher mit längeren Ladezeiten kann die Anwendung des Fahrregimes Rekuperation die Speichernutzung wesentlich verbessern, da mehr Energie in den Speicher ruckgespeist werden kann.

Weiterhin wird festgestellt, dass der Einsatz des Speichers zur Leistungssteigerung die mögliche Zugkraft erhöht. Gleichzeitig sinkt der Gesamtverbrauch bei gleicher Fahrzeit, da eine Fahrzeitreserve für die energiesparende Fahrweise zur Verfügung steht.

5 Optimierung der Motorsteuerung von Mehrmaschinenanlagen

5.1 Einführung

Die Energieversorgung heutiger dieselelektrischer Lokomotiven erfolgt durch eine zentrale Einheit bestehend aus einem Dieselmotor und zumeist einem fremderregten Synchrongenerator. Diese Konfiguration hat sich bewährt, muss sich aber aus heutiger Sicht einigen Herausforderungen stellen. Diese sind:

- steigendes Gewicht und abnehmende Effizienz der Dieselmotoren durch steigende Anforderungen an die Abgasnachbehandlung,
- Inflexibilität gegenüber der Einführung von neuen Energiespartechnologien (Masseverteilung, Einbauvolumen),
- fehlende Redundanz bei Ausfall des Gensets⁵⁸,
- ungünstige Voraussetzungen für die Implementierung von Start-/Stoppsystemen bei Lokomotiven für den Personenverkehr aufgrund der Zugenergieversorgung,
- Abhängigkeit der Fahrzeughersteller von wenigen Genset-Lieferanten und
- steigende Kosten für den Dieselmotor aufgrund hoher Entwicklungskosten zur Einhaltung niedriger Emissionen bei geringen Stückzahlen.

Das Mehrmotorenkonzept ist eine vielversprechende Möglichkeit, diesen Anforderungen zu begegnen. Es beruht darauf, das zentrale Genset durch mehrere kleinere Gensets zu ersetzen. Die Gensets tragen über den gemeinsamen Zwischenkreis zur Abdeckung des Leistungsbedarfs bei. Dabei zeichnet sich das Konzept dadurch aus, dass während Teillastphasen Motoren automatisch abgeschaltet werden können (Start/Stopp) und in diesem Leistungsbereich viele Dieselmotoren am Markt sind, welche in relativ hohen Stückzahlen produziert werden. Weitere Vorteile sind unter anderen die höhere Verfügbarkeit der Lokomotive durch die Redundanz der Motoren und die hohe Modularität, welche die Ableitung kleinerer Leistungsstufen bzw. den alternativen Einbau von Energiespeichern oder den zusätzlichen Einbau von Wärmerückgewinnungssystemen ermöglicht.

Es gibt bisher in Europa nur wenige umgesetzte Mehrmaschinenkonzepte und Veröffentlichungen zu diesem Thema. Für ein nordamerikanisches Projekt wurde von der Fa. Bombardier Transportation (BT) eine Lokomotive entwickelt, die sowohl unter Fahrdraht als auch fahdrahtunabhängig betrieben werden kann. Um im dieselelektrischen Betrieb eine hohe Leistung zur Verfügung zu stellen, wurde ein Motorenkonzept mit zwei Dieselgeneratoren umgesetzt [Vit09]. In den USA sind

⁵⁸ Der Ausfall des Antriebssystems und damit eine Blockade der Strecke generieren in Europa hohe Kosten in Folge von Verspätungen, die auf den verursachenden Betreiber umgelegt werden [EG07]. Beim Einsatz von Diesellokomotiven auf Fernstrecken, z. B. in den USA und den BRIC-Staaten, entstehen aufgrund langer Streckenabschnitte unter Umständen große Verspätungen.

Mehrmaschinenlokomotiven für Rangierlokomotiven seit 2005 verfügbar ([Wur11], [Bro10]). Zu Beginn des Jahres 2011 hat die DB einen Rahmenvertrag über die Lieferung von Lokomotiven für den Regionalverkehr mit der Fa. BT abgeschlossen, deren Auslieferung für den Einsatz bei der DB Regio AG ab dem April 2013 geplant ist [Lan11]. Die TU Dresden hat die BT in der Vorentwicklungsphase unterstützt. Die folgenden Ausführungen basieren z. T. auf den in diesem Zusammenhang durchgeführten Untersuchungen [SHB11].

5.2 Motor-Start/Stopp-Funktion bei Mehrmaschinenanlagen

Hinsichtlich der Kraftstoffeinsparung bei Mehrmotorenlokomotiven ist die Möglichkeit der Abschaltung von einzelnen Gensets in Teillastphasen von großer Bedeutung. Phasen mit sehr niedrigem Leistungsbezug treten im Betrieb von Personenzügen im Regionalverkehr häufig auf. Bei Messfahrten auf der Strecke Hamburg-Cuxhaven (siehe Abschnitt 2.4) wurde ein durchschnittlicher Leerlaufanteil von 52 Prozent ermittelt. Als Motorleerlauf wird dabei der Zustand definiert, in der keine Traktionsleistung erbracht wird. Während dieser Zeit muss das Genset nur die Leistung für die Hilfsbetriebe der Lokomotive und bei Personenzügen zusätzlich für die Zugenergieversorgung zur Verfügung stellen. In Bremsphasen ist die notwendige Leistungsabgabe noch geringer, da die Verbraucher am Zwischenkreis durch die Energierückspeisung (Rekuperation) versorgt werden. Bei den Messungen konnte ein Lastanteil von 61,5 Prozent im Leistungsbereich unter 560 kW festgestellt werden (Abbildung 3-4). In diesem Betriebsbereich ist das Verhältnis zwischen Kraftstoffverbrauch und erbrachter Leistung (spezifischer Kraftstoffverbrauch) bei Einmaschinenanlagen ungünstig. Unter der Prämisse des möglichen Betriebs der Lokomotive mit nur einem Dieselmotor in diesem Lastbereich und der Nutzung identischer Motoren werden im folgenden Viermaschinenkonzepte betrachtet. Die gezeigten Verfahren sind jedoch auch auf andere Mehrmaschinenkonzepte übertragbar.

Ein für die Umsetzung der Motorabschaltung notwendiges Motor-Start/Stopp-System ist durch ein automatisches Ab- und Zuschalten des Dieselmotors in bestimmten Fahrzuständen gekennzeichnet. Bereits bei der Deutschen Reichsbahn wurden Rangierlokomotiven (BR 106) mit einer Start/Stopp-Automatik ausgerüstet [FR88]. Heute sind insbesondere in den USA Lokomotiven im Rangier- und Güterverkehr mit Start/Stopp-System im Einsatz, die den automatischen Motorstopp bei längeren Standphasen auslösen [Gai04]. Bei Regionalzügen mit einem Genset muss der Dieselmotor permanent laufen, da die Zugenergieversorgung in Standphasen aufrecht erhalten werden muss. Dies ist beim Mehrmotorenkonzept nicht kritisch, da im Stand bereits ein Genset die Zugsammelschienenleistung aufbringen kann.

Eine Herausforderung bei Start/Stopp-Systemen von Kraftfahrzeugen stellt die eingeschränkte Verfügbarkeit bei bestimmten Betriebsbedingungen wie Kühlmitteltemperatur, Bremsdruck, Batterieladezustand und aktuelle Hilfsbetriebeleistung dar [Sch08a]. Diese Ausschaltverhinderer spielen bei der teilweisen Motorabschaltung in Mehrmaschinenanlagen in Bahnfahrzeugen keine Rolle, da die Kühlmitteltemperatur im Dauerbetrieb trotz Stoppphasen aufgrund der großen thermischen Zeitkonstanten kaum absinkt und die Nebenaggregate durch das weiterhin laufende Genset ver-

sorgt werden. Restriktionen bezüglich des Startsystems kann durch eine geeignete Auslegung begegnet werden.⁵⁹

5.3 Umsetzung

5.3.1 Konstruktive Integration

Aus Sicht der Nachrüstbarkeit älterer Lokomotiven bietet es sich an, eine Mehrmaschinenanlage so zu entwerfen, dass sie sich mit geringen konstruktiven Änderungen in ein vorhandenes Lokomotivkonzept integrieren lässt. Die Gensets sind möglichst identisch aufzubauen, um die Modularität und die Austauschbarkeit der Komponenten zu gewährleisten. Das Mehrmotorenkonzept führt bei gleichen Randbedingungen zur Erhöhung der Fahrzeugmasse, was in den USA aufgrund der dort üblichen Radsatzlasten unkritisch ist. Für europäische Verhältnisse ist die Umsetzung zumindest auf vierachsigen Lokomotiven nur eingeschränkt möglich und erfordert massereduzierende Maßnahmen, z. B. den Einsatz permanenterregter Synchronmaschinen [Neu08]. Eine konstruktive Umsetzung des Systems in der Lokomotive TRAXX DME der Fa. BT ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

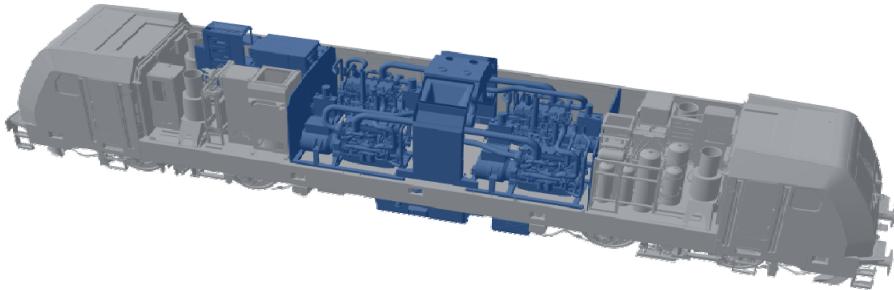


Abbildung 5-1: Integration einer Mehrmaschinenanlage in eine Lokomotive mit Mittelgang [Lan11]

5.3.2 Elektrische Integration

Die vier Gensets werden parallel an den Zwischenkreis angeschlossen. Die Gleichrichtung der dreiphasigen Generatorspannung kann über eine ungesteuerte Gleichrichterbrücke, eine gesteuerte Gleichrichterbrücke oder eine Gleichrichterbrücke mit nachgeschaltetem DC/DC-Wandler erfolgen. Die Stromrichterkonfiguration inklusive der rückspeisefähigen Fahrmotoren, des Bremswiderstands, der Zugenergieversorgung und des Hilfsbetriebsumrichters verändert sich gegenüber dem Einmaschinenkonzept nicht (Abbildung 5-2).

Als Generatoren können prinzipiell fremderregte Synchrongeneratoren, permanenterregte Synchronmaschinen und Asynchrongeneratoren zum Einsatz kommen. Der Betrieb von Asynchrongeneratoren ist eher unüblich und fordert den Einsatz eines Vierquadrantenstellers als Umrichter, da das Drehfeld auf Ausgangsseite der Generatoren erzeugt werden muss. Die üblichen fremderregten Synchronmaschinen sind auch in diesem Konzept einsetzbar. Aufgrund der geringeren Mas-

⁵⁹ Kritisch zu prüfen sind Anforderungen der Dieselmotorhersteller bezüglich vorgeschriebenen Leerlaufzeiten vor oder nach Lastphasen. Derartige Anforderungen sind jedoch motor- bzw. herstellerspezifisch, deshalb soll im Weiteren nicht darauf eingegangen werden.

se wurden im vorliegenden Fall jedoch permanenterregte Synchronmaschinen eingesetzt, welche einen guten Wirkungsgrad aufweisen und wesentlich kompakter als fremderregte Synchronmaschinen sind. Nachteilig ist die fehlende Möglichkeit zur Steuerung des Erregerfeldes, welche bei fremderregten Synchronmaschinen die Möglichkeit zur Stellung der Ausgangsspannung bietet.

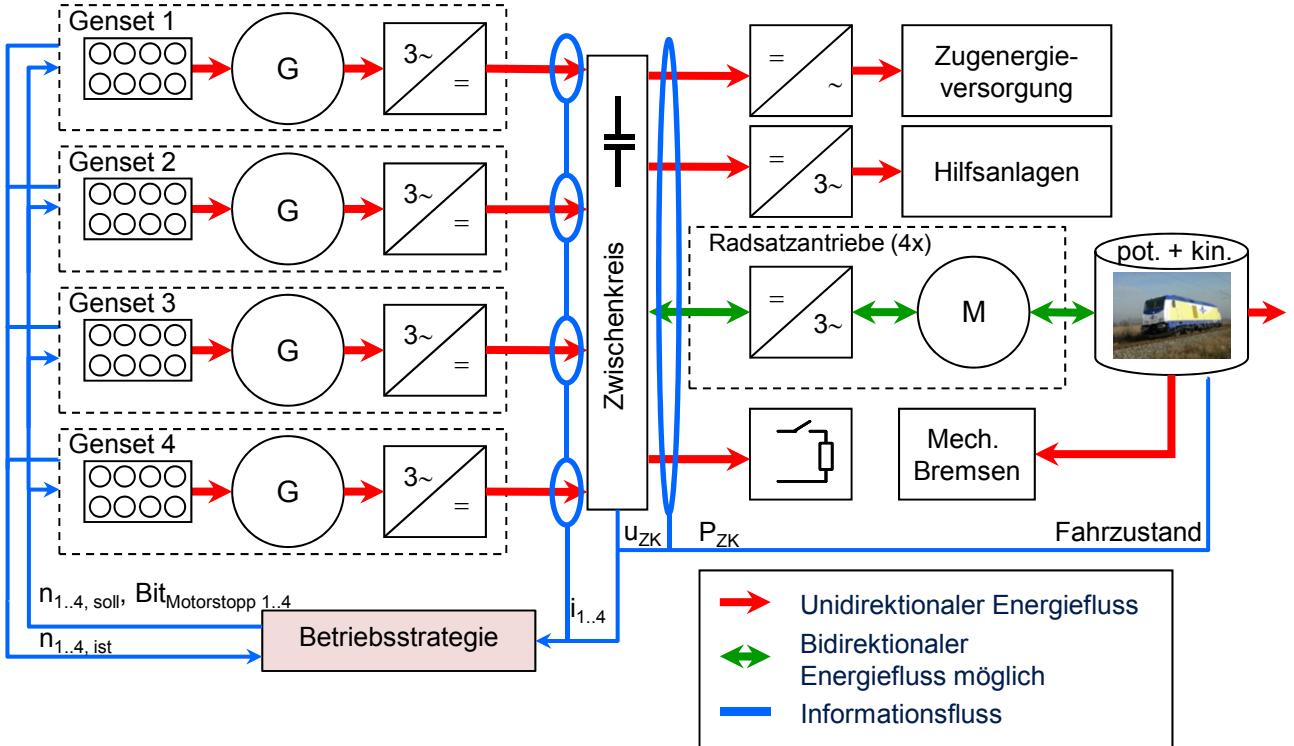


Abbildung 5-2: Energie- und Informationsfluss im Antriebsstrang der Mehrmotorenlokomotive

5.3.3 Start/Stopp-System

Zur Realisierung eines Start/Stopp-Konzepts für Lokomotiven im Regionalverkehr muss ein Startsystem entworfen werden, welches für die bis zu hundertfach höhere Startfrequenz der Motoren gegenüber dem herkömmlichen Betrieb mit nur wenigen Motorstarts pro Tag geeignet ist. Ein Startsystem ist durch eine Energiequelle, eine Starteinrichtung und die Anbindung der Starteinrichtung charakterisiert.

Folgende Anforderungen können an ein Start/Stopp-System gestellt werden:

- wesentlich über 100.000 Startzyklen für eine angemessene Lebensdauer⁶⁰,
- Wirtschaftlichkeit des Systems,
- geringe Zusatzmasse,
- Startleistung und -energie müssen auch bei tiefen Temperaturen bereitgestellt werden können und

⁶⁰ Zyklenabschätzung: ca. 180.000 Starts bei 100 Starts pro Tag und fünf Jahren Lebensdauer bei Motorabschaltung auch in kurzen Teillastphasen

- der Startvorgang muss innerhalb einer bestimmten Zeit erfolgen.

Als Energiequelle für den Startvorgang untersuchte HEGHMANNS im Rahmen einer Diplomarbeit mechanische Federspeicher, hydropneumatische Akkumulatoren, Doppelschichtkondensatoren, verschiedene Batterietypen und Lufterdruckspeicher ([Heg11], S. 27 ff.). Er stellte fest, dass bei einer laufenden Maschine Startermotoren über den Zwischenkreis versorgt werden können. Analog zu den Speichertypen kann der Start über Leistungswandler verschiedener Domänen erfolgen. Es bietet sich ein Start über den Generator als auch die Ankopplung eines Federstarters oder von hydraulischen, elektrischen bzw. pneumatischen Motoren an. Die Analyse ergab, dass die Kopplung von Startanlagen über ein Starterritzel aufgrund dessen Lebensdauer schwierig ist. Verfahren, die dieses zum Start benötigen, wurden daraufhin von der Betrachtung ausgeschlossen. Der Start kann jedoch alternativ über direkt an der Kurbelwelle sitzenden Motoren erfolgen. Die Auslegung eines solchen Systems wurde für drei Varianten erfolgreich durchgeführt:

- hydropneumatischer Kolbenspeicher in Kombination mit einem Radialkolbenmotor,
- Start über den Generator mit Energiespeicherung in Doppelschichtkondensatoren und
- Start über den Generator unter Nutzung der Zwischenkreisspannung über Wechselrichter.

Letztere Variante stellt sich aufgrund des Verzichts auf zusätzliche Startermotoren und Speicher-Einheiten bezüglich des Mehrgewichts, des benötigten Einbauvolumens und der Kosten als günstig dar ([Heg11], S. 79) und wird deshalb bei den weiteren Betrachtungen berücksichtigt. Der Start des ersten Motors kann nicht über den Zwischenkreis erfolgen. Als alternative Energiequellen bieten sich Doppelschichtkondensatoren oder eine Batterie an.

5.4 Topologien

Das Spannungsverhalten der Generatoren ist bei ungesteuerten Gleichrichterbrücken entscheidend für die Leistungsübertragung der Gensets in den Zwischenkreis. Die Ausgangsspannung fremderregter Synchrongeneratoren ist in Grenzen über die Erregung steuerbar. Bei permanenterregten Synchrongeneratoren trifft dies nicht zu. Bei diesen Maschinen ist die Leerlaufspannung $u_{0,LL}$ an den Klemmen von der Maschinenkonstante k , dem magnetischen Fluss erzeugt durch die Permanentmagneten ϕ und insbesondere von der Drehfrequenz ω abhängig:

$$u_{0,LL} = k \cdot \phi \cdot \omega. \quad (5.1)$$

Im Betrieb fällt die Klemmenspannung bei ohmscher Last proportional mit dem Generatorstrom ab. Weiterhin gibt es eine Abhängigkeit des magnetischen Fluxes von der Rotortemperatur und fertigungsbedingte Toleranzen in $k \cdot \phi$, die jedoch klein gegenüber möglichen Drehzahlunterschieden sind. Die in Abbildung 5-2 dargestellte Topologie lässt Spielraum für die Umsetzung von zwei Grundvarianten, die sich auch hinsichtlich der Regelungseigenschaften unterscheiden. Zum einen können die Gleichrichter der einzelnen Gensets direkt parallel an den DC-Zwischenkreis gekoppelt werden. Dadurch wird der Optimierungsspielraum eingeschränkt. Die freie Stellung von Drehzahl und Leistung ist nicht möglich, da aufgrund (5.1) nur die Gensets zur Deckung des Leistungsbe-

darfs im Zwischenkreis beitragen können, die in einem Drehzahlband um die höchste Generatordrehzahl arbeiten. Eine Motorabschaltung bei niedrigem Leistungsbedarf ist jedoch weiterhin möglich.

Eine zweite Variante entsteht durch die Nachschaltung je eines zusätzlichen DC/DC-Wandlers oder bei Verwendung von gesteuerten B6-Gleichrichtern. Die Bandbreite der Spannungsübersetzung dieser Systeme ist dabei so auszulegen, dass die zwischenkreisseitigen Spannungsunterschiede aufgrund von Drehzahlschwankungen ausgeglichen werden. Dies erhöht die Flexibilität bei der Auslegung der Betriebsstrategie, birgt jedoch einen höheren Aufwand durch die zusätzlichen leistungselektronischen Komponenten. Ob sich der Vorteil der Implementierung lohnt, soll in einer beispielhaften Auslegung untersucht werden.

Die betrachteten Varianten gehen von einer Parallelschaltung der Gensets aus. Eine Reihenschaltung wird aufgrund der extremen Absenkung der Zwischenkreisspannung bei der Abschaltung einzelner Gensets, welche die Start/Stopp-Funktion praktisch unmöglich machen, verworfen.

5.5 Optimierung auf Basis repräsentativer Betriebspunkte

Bei der Entwicklung einer Betriebsstrategie müssen die Sollkurve der leistungsabhängigen Drehzahl der einzelnen Gensets (Generatorkurve), die Steuerung der Lastverteilung auf die Gensets sowie die gewählte Start/Stopp-Strategie berücksichtigt werden (Abbildung 5-3). Dabei treten Wechselwirkungen bezüglich der benötigten Leistungsreserve und der Zwischenkreisspannung auf, welche beachtet werden müssen. Die erstellte Strategie hat Auswirkungen auf lebenszykluskostenrelevante Parameter wie Kraftstoffverbrauch und Wartungsintervalle. Folgende Größen beeinflussen die Lebensdauer:

- die Starthäufigkeit,
- das Lastprofil,
- die lastabhängige Drehzahlsteuerung (konstant, dynamisch),
- die Betriebsstunden (in Abhängigkeit vom Lastprofil) und
- das dynamische Verhalten (Lastwechsel, Drehzahlgradienten usw.).

Für die Auswirkungen dieser Parameter existieren keine allgemeingültigen Beziehungen, weil diese wesentlich von den konstruktiven Merkmalen (z. B. dem Startsystem und dem Turbolader) und der Auslegung von Dieselmotoren abhängen. Deshalb soll nur die Optimierung des Kraftstoffverbrauchs betrachtet werden. Die Optimierung hinsichtlich der Betriebsstunden ist analog möglich. Die Untersuchung des Alterungseinflusses der Starthäufigkeit kann jedoch nur über die Betrachtung von Fahrspielen erfolgen.

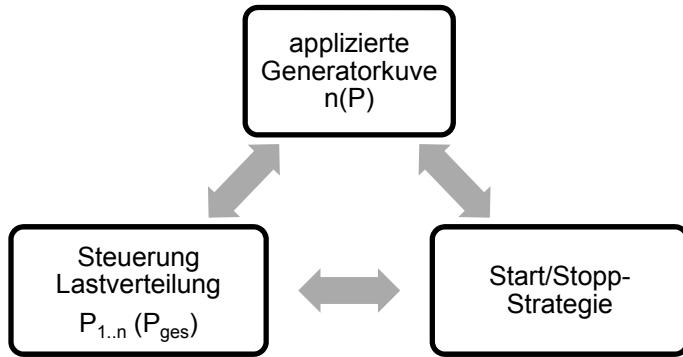


Abbildung 5-3: Stellmöglichkeiten einer betriebsoptimalen Steuerung

5.5.1 Optimierung der Generatorkurve

Bei der Umsetzung der Optimierung bietet es sich an, in einem ersten Schritt eine geeignete Generatorkurve zu applizieren. Das Verfahren ist hierbei analog zum Vorgehen bei Einmaschinenanlagen. Zu Beginn soll die optimale Generatorkennlinie $n_{\text{opt}}(P)$ gefunden werden. Die Steuerregel folgt den Argumenten entlang der Kurve des optimalen Wirkungsgrads, ermittelt durch Überlagerung der Kennfelder des spezifischen Verbrauchs b_e und des Generatorwirkungsgrads η_{GEN} :

$$n_{\text{GEN,opt}}(P_{\text{GEN}}) = \arg \min_{n_{\text{min}} < n < n_{\text{max}}} \left[\frac{b_e(n, P_{\text{GEN}})}{\eta_{\text{GEN}}(n, P_{\text{GEN}})} \right] \quad (5.2)$$

mit $P_{\text{VKM}}(n) < P_{\text{VKM,max,dyn}}(n)$.

Die zu berücksichtigende dynamische Leistungsbegrenzung $P_{\text{VKM,max,dyn}}$ repräsentiert den notwendigen Leistungüberschuss, um die äquivalente Trägheit des kompletten Gensets J_{Genset} mit dem maximal erlaubten Drehzahlanstieg α_{max} zu beschleunigen:

$$P_{\text{VKM,max,dyn}}(n) = P_{\text{VKM,max}}(n) - (J_{\text{Genset}} \cdot \alpha_{\text{max}} \cdot 2\pi \cdot n) \quad (5.3)$$

Diese Restriktion sichert die bestmögliche Dynamik des Gensets. Ein genügender Abstand der Sollkennlinie zur Vollastkurve ermöglicht außerdem einen Ausgleich von Lastsprüngen, wie sie bei sprunghafter Aufschaltung von Nebenverbrauchern auftreten können.⁶¹ Weiterhin sollte darauf geachtet werden, dass die Kurve möglichst stetig ist und die entstehenden Drehzahlgradienten moderat sind. Bei vielen Motoren ist aufgrund der typischen Kennfeldeigenschaften diese Anforderung direkt erfüllt, ansonsten muss die Anforderung als Nebenbedingung der Optimierung formuliert oder die Kurven per Hand angepasst werden. Die entstehenden Verläufe für einen beispielhaft ausgewählten Dieselmotor sind in Abbildung 5-4 dargestellt.

⁶¹ Das digitale Zuschalten von Verbrauchern höherer Leistungsklasse (z. B. der Wagenheizung) ist heute nicht mehr üblich. Sollte dies in einem Zugverband mit älteren Wagen trotzdem vorkommen, wird dies bei der Lokomotive TRAXX DE durch eine kurzzeitige Anpassung der Traktionsleistung abgefangen [Sch11d].

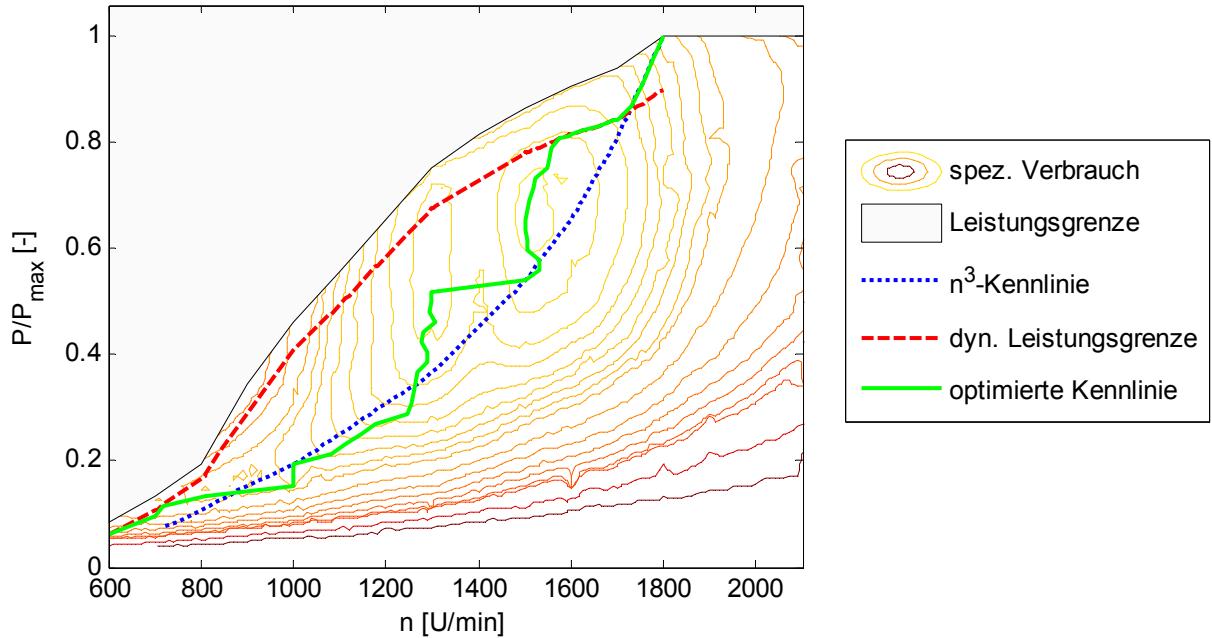


Abbildung 5-4: Darstellung der Muschelkurven des spezifischen Kraftstoffverbrauchs für den untersuchten Dieselmotor [BT10] mit verschiedenen Generatorkennlinien

Das erreichbare Potential einer solchen Optimierung ist lastpunktabhängig (Abbildung 5-5). Gegenüber der klassischen n^3 -Kennlinie können Einsparungen von über einem Prozent erreicht werden.

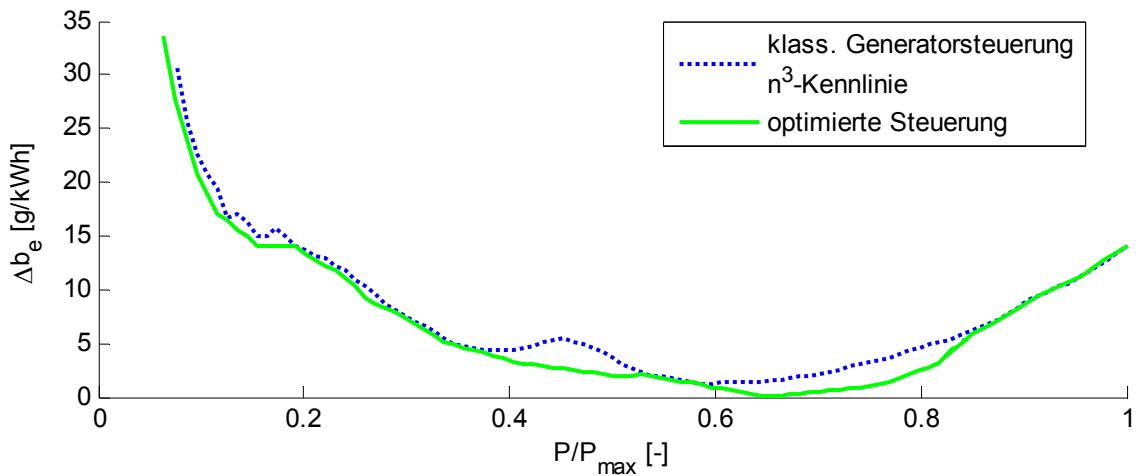


Abbildung 5-5: Darstellung der Differenz des leistungsabhängigen Kraftstoffverbrauchs zum Minimalverbrauch in Abhängigkeit von der verwendeten Generatorkennlinie

5.5.2 Steuerung der Lastverteilung

Nach der Erstellung einer optimalen Generatorkurve kann im Folgenden die Vorsteuerung der Lastverteilung unter Berücksichtigung der Konfiguration und der Verfügbarkeit der Start/Stopp-Funktion parametrisiert werden.

Bei freier Stellung der Drehzahl der Gensets entsteht unter Berücksichtigung des Leistungsvermögens der Gensets das folgende Optimierungsproblem für die Minimierung des Kraftstoffmassenstroms $\dot{m}_{Kr}(P_{ZK})$:

$$\begin{aligned} \left(\frac{k_i(P_{ZK})}{n_i(P_{ZK})} \right)_{i=1}^4 &= \arg \min_{k_i, n_i} \left[\sum_{i=1}^4 \dot{m}_{Kr, \text{VKM}} \left(\frac{k_i \cdot P_{ZK}}{\eta_{\text{GEN}}(k_i \cdot P_{ZK}, n_i)}, n_i \right) \right] \quad \text{mit } \sum k_i = 1; k_i \geq 0; n_i \in n_{\text{zul}} \\ \text{und } \dot{m}_{Kr, \text{min, Var1}}(P_{ZK}) &= \sum_{i=1}^4 \dot{m}_{Kr, \text{VKM}} \left[\left(\frac{k_i(P_{ZK})}{n_i(P_{ZK})} \right) \right]. \end{aligned} \quad (5.4)$$

Dabei wird die Betriebsstrategie durch den relativen Lastanteil an der Zwischenkreisleistung k_i und die Drehzahl des jeweiligen Gensets n_i repräsentiert.

Bei der Einschränkung durch den Einsatz eines ungesteuerten Gleichrichters vereinfacht sich das Optimierungsproblem, da die Gensets nun nicht mehr in verschiedenen Lastpunkten laufen können. Für jede geforderte Zwischenkreisleistung P_{ZK} muss die verbrauchsoptimale Anzahl der laufenden Gensets a und die korrespondierende Solldrehzahl n gefunden werden:

$$\dot{m}_{Kr, \text{min, Var2}}(P_{ZK}) = \min_{a, n} \left[a \cdot \dot{m}_{Kr, \text{VKM}} \left(\frac{P_{ZK}}{a \cdot \eta_{\text{GEN}}(P_{ZK} / a, n)}, n \right) \right] \quad \text{mit } a \in \{1, 2, 3, 4\} \text{ und } n \in n_{\text{zul}}. \quad (5.5)$$

In Abbildung 5-6 sind die daraus folgenden Dieselmotorlastpunkte dargestellt. Es sind die Leistungssollwerte der vier Gensets über der Gesamtleistungsanforderung abgebildet. Die korrespondierenden Drehzahlen der einzelnen Gensets ergeben sich aus der Generatorkurve. Die Kurven zur Auslegungsvariante mit gesteuerten Gleichrichtern sind im Diagramm oben dargestellt. Bei der Variante ohne Start/Stopp fällt auf, dass die Motoren erst parallel in das erste Minimum des spezifischen Kraftstoffverbrauchs hochgefahren werden. Danach werden die Motoren sukzessive in den Betriebspunkt des globalen Minimums des spezifischen Kraftstoffverbrauchs nachgeführt. Im höheren Leistungsbereich werden die Motoren mit gleichmäßiger Lastaufteilung betrieben. Bei aktiver Start/Stopp-Funktion ergibt sich ein anderes Bild. Die Motoren werden bevorzugt im Stoppbetrieb gehalten und nacheinander in den Punkt des globalen Verbrauchsminimums gesteuert. Ab einem gewissen Leistungsniveau bildet ein gleichmäßiges Hochfahren der Gensets bis zum Vollastpunkt die verbrauchsoptimale Strategie.

Die optimale Strategie für die Auslegungsvariante mit ungesteuerten Gleichrichtern weicht davon ab. Für den Betrieb ohne Start/Stopp-System ist beinahe ausnahmslos das parallele Hochfahren aller Gensets optimal, während bei einem System mit Start/Stopp die Motoren sukzessive gestartet und nachfolgend bei gleicher Leistungsaufnahme aller Gensets hochgefahrene werden.

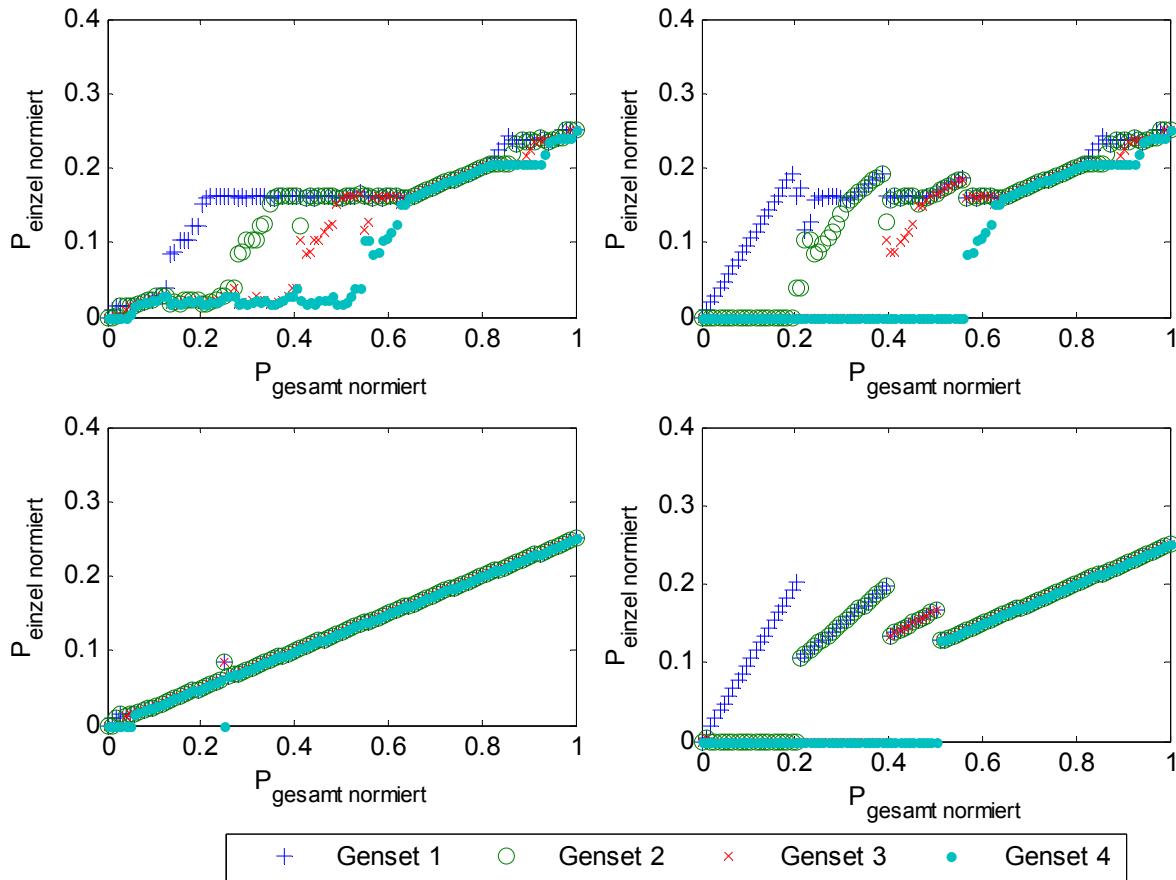


Abbildung 5-6: Optimale Motorlastverteilung (links: ohne Start/Stopp, rechts: mit Start/Stopp, oben: freie Drehzahlstellung, unten: ungesteuerte Gleichrichter)

Auf Basis des in Abbildung 3-4 gezeigten Lastprofils können nun die Verbrauchswerte für die Mittelwerte der Lastbereiche ermittelt werden (Abbildung 5-7). Dabei wird deutlich, dass der Vollastpunkt den Verbrauch dominiert. Die Lastbereiche, welche Phasen ohne Traktion repräsentieren, also 100 kW mechanisch für das generatorische Bremsen bzw. 300 kW mechanisch für Stand- und Ausrollphasen mit eingeschalteter Zugsammelschienenleistung, haben jedoch auch einen sehr hohen Anteil am Gesamtverbrauch. Gerade in diesen Phasen kann die Abschaltung von Motoren Verbrauchsvorteile bringen, welche im gezeigten Fall 1,7 Prozent gegenüber einem Mehrmotorenkonzept ohne Start/Stopp ergeben.⁶² Die Möglichkeit des Stellens verschiedener Drehzahlen von an der Leistungsbereitstellung beteiligten Motoren bringt jedoch nur marginale Einsparungen von unter 0,2 Prozentpunkten, weshalb die Auslegungsvariante mit ungesteuerten Gleichrichtern aufgrund des geringeren Aufwands zu bevorzugen ist. Wie groß die Einsparung gegenüber einer Lösung mit nur einem Genset ausfällt, hängt stark von den verglichenen Motorentypen und dem Einsatzprofil ab und ist nicht pauschal zu beantworten. In jedem Fall sinken mit der zeitweisen Ab-

⁶² Das errechnete Einsparpotential stellt einen Maximalwert dar. Voraussetzung für die Erreichung dieses Einsparpotentials ist die volle Verfügbarkeit der Start/Stopp-Funktion auch im dynamischen Betrieb. Ist diese eingeschränkt, ist die Verfügbarkeit mit Hilfe der dynamischen Simulation (siehe auch Abschnitt 5.6) zu prüfen.

schaltung einzelner Motoren die Betriebszeiten der Motoren gegenüber den Betriebszeiten der Lokomotive.

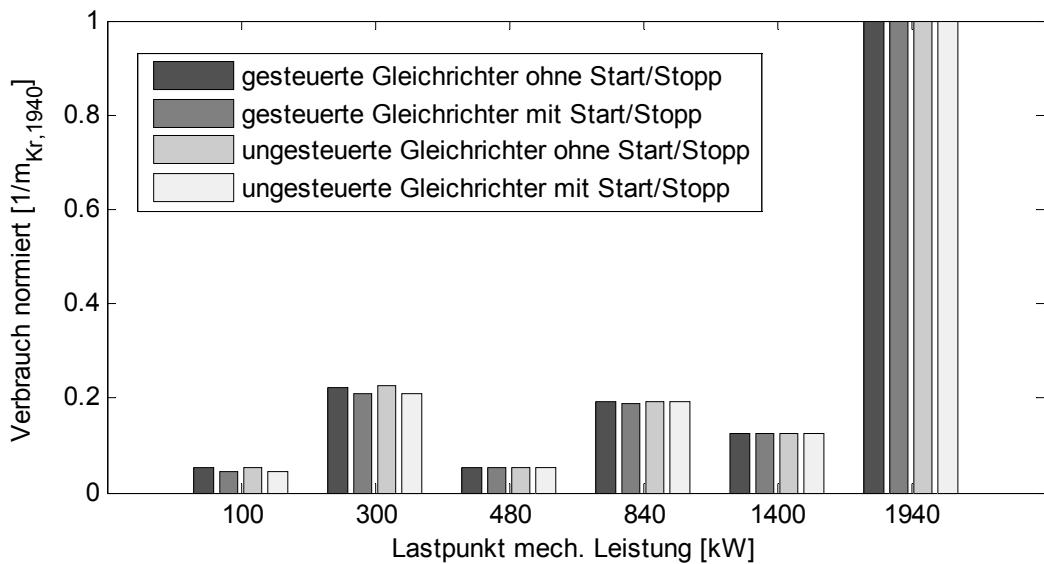


Abbildung 5-7: Normierter kumulierter Kraftstoffverbrauch in repräsentativen Lastpunkten

5.6 Einbindung in ein Regelungskonzept und dynamische Simulation

Im Folgenden soll ein Vorschlag für ein Regelungskonzept unterbreitet werden, welches die Integration der Betriebsstrategie des Mehrmaschinenkonzepts als Vorsteuerung im Fahrzeug erläutert. Ziel ist es, die gewünschte Lastaufteilung auf Basis der zwischenkreisseitigen Leistung der Generatoren sicherzustellen, welche über die Generatorströme und die zugehörige Zwischenkreisleistung ermittelt wird (Abbildung 5-8). Nach dem auf Basis quasistatischer Betrachtungen diskutiertem Betriebskonzept werden die Generatorenleistungen $P_{\text{soll},1..4}$ als Aufteilung der Zwischenkreisleistung P_{ZK} vorgegeben. Die Solldrehzahlen $n_{\text{soll},1..4}$ auf Basis der applizierten Generatorkurve werden mit Hilfe der Kennfeldinterpolation ermittelt. Nachfolgend sorgt eine Drehzahlregelung mit überlagerter Leistungsregelung für die Umsetzung der Sollvorgaben. Für die Drehzahlregelung ist es in der Regel zweckmäßig, die motorinterne Regelung zu nutzen. Eine Überwachung der Leistungsgrößen kann in einem Steuergerät außerhalb des Motors erfolgen.

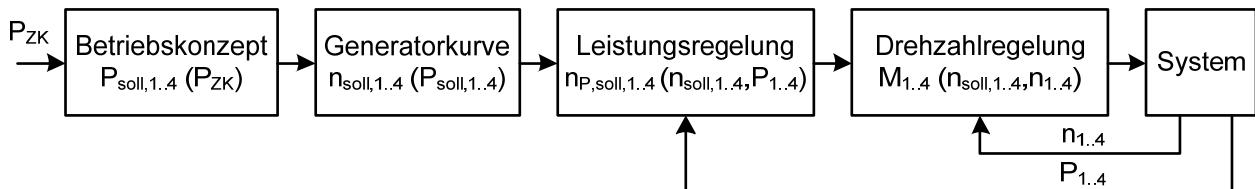


Abbildung 5-8: Vorschlag für ein Regelungskonzept zur Umsetzung der Betriebsstrategie

Auf Grundlage der Verbrauchsbelastungen erfolgt die Erstellung einer Strategie für den realen Fahrbetrieb. In der Betriebsstrategie muss ggf. berücksichtigt werden, dass beim Beschleunigen des

Zuges auf Streckengeschwindigkeit schnell die volle Traktionsleistung zur Verfügung stehen soll. Dies kann durch eine Schnellstartstrategie erreicht werden, die von der gefundenen Strategie für die Normalfahrt abweicht. Durch den Einsatz eines Fahrtoptimierungsrechners, der mit Hilfe von Zug-, Strecken- und Fahrplandaten sowie der aktuellen Position des Zuges vorausschauend die zu jedem Zeitpunkt benötigte Leistungsanforderung berechnet, kann das Verhalten weiter optimiert werden. Dabei kann bei zukünftigen Betrachtungen z. B. die dynamische Programmierung eingesetzt werden, welche auf Basis der in Gleichung (5.5) dargestellten Beziehung umgesetzt wird. Um das schnelle Umschalten zwischen der Anzahl der laufenden Gensets zu verhindern, was Lärm und Verbrauchsachteile zur Folge hat, kann in der dynamischen Programmierung ein geeigneter Strafparameter für das Abschalten von Gensets implementiert werden.

Nach Auswahl eines bestimmten Betriebskonzepts bietet sich die Simulation des dynamischen Systems zur weiteren rechnergestützten Auslegung des Steuerungssystems an (siehe auch Abschnitt 3.3.4). Über eine hochfrequente dynamische Modellierung, welche das Schaltverhalten der leistungselektronischen Bauelemente beinhaltet, ist die Ermittlung des Spannungsverhalten eines Gensets unter Last in einem Schaltungssimulationsprogramm möglich. An einem solchen virtuellen Prüfstand kann das Kennfeld $I_{\text{GEN,DC}}(U_{\text{GEN,DC}}, n)$ für das Effektivwertmodell generiert werden [SHB11]. Die analytische Erstellung einer Beziehung für die Abhängigkeit des DC-seitigen Generatorstroms in Abhängigkeit von der Zwischenkreisspannung und der Drehzahl ist ohne Kenntnis der vorherrschenden Phasenverschiebung ansonsten schwer möglich. Vor dem Aufbau komplexerer hochdynamischer Modelle mit mehreren Maschinen kann auf Basis des virtuellen Gensetprüfstands weiterhin die Plausibilität des Modellverhaltens in bestimmten Betriebspunkten gegenüber Datenblattangaben des Herstellers überprüft werden (Abbildung 5-9).

Das Effektivwertmodell bietet sich für die Auslegung des Steuerungssystems und der Motorregler an. Das Systemverhalten und die Umsetzbarkeit vorgegebener Lastprofile kann mit überschaubarem Zeitaufwand simuliert werden. Weiterhin ist es möglich, die Verfügbarkeit des Start/Stopp-Systems in Abhängigkeit von der Betriebsstrategie zu überprüfen. Dies erlaubt die Präzisierung der Aussagen zur Häufigkeit der Startvorgänge, der effektiven Motorlaufzeiten und des Kraftstoffverbrauchs.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zeigen eine hohe Verfügbarkeit der Start/Stopp-Funktion und eine wesentliche Reduktion der Motorbetriebsstunden. Die Dynamik der bisherigen Lokomotive kann aufgrund der etwas höheren zulässigen Dynamik der Motoren übertroffen werden. Die durchgeführten Simulationsläufe im hochfrequenten Bereich zeigen keine Probleme. Dies deckt sich mit Untersuchungen an einem Miniaturmehrmaschinenprüfstand⁶³. Niederfrequente Schwebungen zwischen den Gensets können akustisch als Wummern wahrgenommen werden,

⁶³ An der TU Dresden wurde ein Mehrmotorenprüfstand mit vier Dieselgeneratoren (jeweils 9 kVA elektrische Leistung) aufgebaut, welche über ungesteuerte B6-Brücken den kondensatorgestützten DC-Zwischenkreis speisen [HSBG12b]. Die elektrische Belastung erfolgt über einen ohmschen Widerstand, dessen Leistungsaufnahme über einen Gleichstromsteller gesteuert werden kann.

haben aber keine Auswirkungen auf den Schalleistungspegel und sind zumindest für den Passagierkomfort unkritisch.

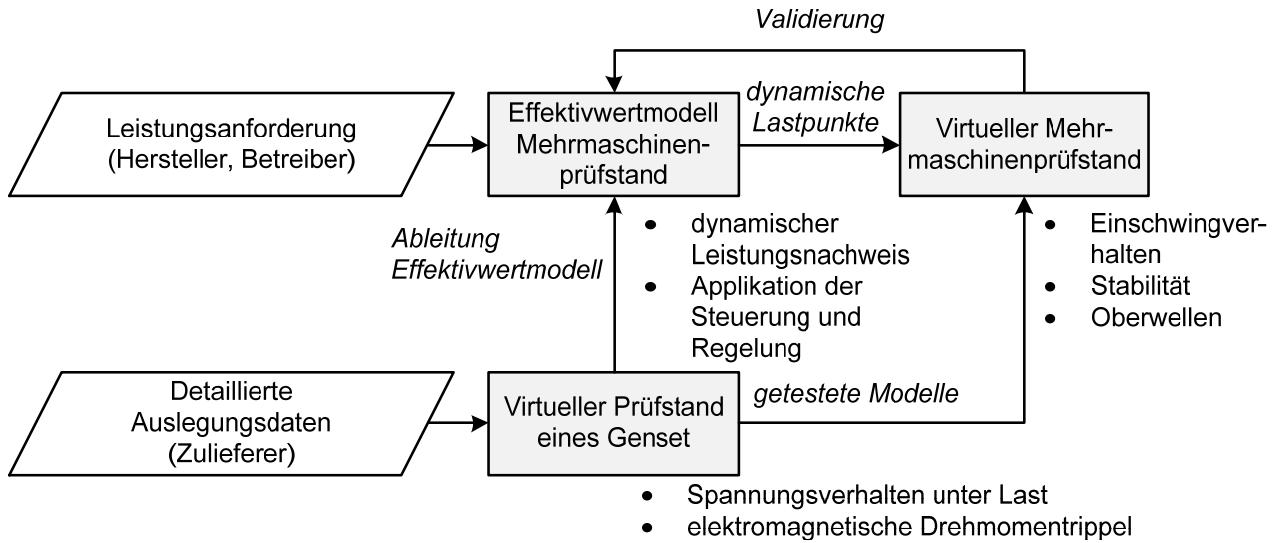


Abbildung 5-9: Dynamische Simulation auf verschiedenen Modellebenen

5.7 Zusammenfassung

Das Mehrmotorenkonzept bietet wegen der hohen Flexibilität Vorteile gegenüber Einmaschinenanlagen. Unter dem Gesichtspunkt einer gewünschten Reduktion des Kraftstoffverbrauchs spielt insbesondere die Start/Stopp-Funktion eine wichtige Rolle, weil durch sie der Betrieb der VKM in relativ schlechten Teillastwirkungsgraden vermieden werden kann. Für Mehrmaschinenanlagen ist aufgrund der gewonnenen Freiheitsgrade die Erstellung einer Betriebsstrategie notwendig, die für die Implementierung im Fahrzeug als Vorsteuerung genutzt werden kann. Die Möglichkeit der Optimierung mit Hilfe quasistatischer Betrachtungen wurde gezeigt. Dabei stellte sich heraus, dass das Einsparpotential bei der komplexeren Umsetzungsvariante mit DC/DC-Wandlern zur Spannungsanpassung gegenüber der Verwendung ungesteuerter Halbleiter vernachlässigbar ist. Unter Kenntnis der detaillierten Regelungsstrategie muss das dynamische Verhalten eines solchen Systems untersucht werden, um die Leistungsfähigkeit des Systems und die Verfügbarkeit der Start/Stopp-Funktion inklusive der Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch und die Betriebsstunden der einzelnen Gensets zu verifizieren.

Weiterführend könnten analog zu den bei den Speichertechnologien vorgestellten Verfahren vorausschauende Betriebsstrategien implementiert werden. Unter Berücksichtigung des Mehrverbrauchs für den Start der Gensets und der Vor- und Nachlaufzeiten kann so der dynamische Betrieb weiter optimiert werden.

6 Optimierung der Fahrzeugauslegung

In diesem Kapitel wird eine Methode dargestellt, mit der die Antriebs- und Energiespeicherkonfiguration einer dieselelektrischen Hybridlokomotive gefunden werden kann, welche zu minimalen Lebenszykluskosten (engl. Life Cycle Cost - LCC) führt. Dafür wird ein bereits bestehendes Programmmodul zur evolutionären mehrkriteriellen Optimierung genutzt. Den wesentlichen Neuheitsgrad stellen die Ansätze zur Aufbereitung der Problemstellung für die Optimierung dar.

6.1 Vorgehen

In den vorherigen Kapiteln wurden Algorithmen dargestellt, mit denen der Kraftstoffverbrauch unter dem Einsatz optimierter Betriebsstrategien für spezifische Fahrzeugkonfigurationen berechnet werden kann. Diese Information liefert jedoch noch keine direkte Vorhersage der ökonomischen Effizienz des Fahrzeugs. Es werden Modelle benötigt, welche auch die anderen Kostenbestandteile der LCC berücksichtigen. Aus ökonomischer Sicht sind die LCC durch die Anschaffungskosten, die Instandhaltungskosten, die Kosten für die Betriebsstoffe, welche maßgeblich durch die Kraftstoffkosten geprägt sind, und die Entsorgungskosten definiert. Diese werden auch als direkte Betriebskosten bezeichnet (engl. Direct Operating Costs) [Sch95]. Die Aufwendungen des Betreibers für die Triebfahrzeugführer und die Fahrzeugversicherung und andere von den Entwurfsvariablen nicht beeinflusste Parameter werden im Folgenden nicht berücksichtigt. Dieses Vorgehen hat sich auch bei der Evaluierung von Teilsystemen für Flugzeuge bewährt, bei welchen die größte Dichte an Veröffentlichungen zu diesem Thema zu verzeichnen ist ([Sch95], [Lem01]). Veröffentlichungen aus der Bahntechnik beziehen sich zumeist auf Bahnbetrieb und -systeme ([Wol02], [Sch07], [Met09]).

Zunächst ist ein Modellansatz zur Berechnung der Lebenszykluskosten aufzustellen. Die Analyse wird dabei auf Basis der vergleichenden Betrachtung gegenüber der ursprünglichen Lokkonfiguration durchgeführt, deren Grundkostenwerte von der Fa. BT bereitgestellt wurden [Ger10].⁶⁴ Bei diesem Vorgehen handelt es sich um das Prinzip der analogen Kostenmethode [DIN04]. Die Anwendung dieses Prinzips auf die Problemstellung „Optimierung von Schienenfahrzeugen mit Speichersystemen zur Rekuperation“ ist in dieser Form noch nicht bekannt. Eine Aufbereitung der Methodik wurde erstmals durch ZIMMERMANN in dessen Diplomarbeit [Zim11] vorgestellt. Die Forschungsergebnisse der Speicheroptimierung und der Konfigurationsoptimierung wurden nachfolgend in einem Tagungsbeitrag veröffentlicht [SZB11].

Zur Bestimmung der Verbrauchskosten steht das Berechnungsprogramm Hybrid Train Optimizer (siehe Kapitel 3) zur Verfügung, welches einen optimalen Kraftstoffverbrauch für beliebige Strecken und Speicherkonfigurationen unter Berücksichtigung eines Fahrzeitzuschlags bestimmt. Auf dieser Grundlage werden für verschiedene Fahraufgaben ökonomisch optimierte Antriebs- und

⁶⁴ Die erhaltenen Werte sind Richtwerte und spiegeln den hier untersuchten Stand der Lok wieder. Die Kosten für die Instandhaltung sind zudem betreiberspezifisch. Die hier durchgeführten Untersuchungen sollen demnach nur die Möglichkeiten einer Methodik aufzeigen.

Speicherkonfigurationen ermittelt. Die mehrkriterielle Optimierung erzeugt dabei eine Vielzahl pareto-optimaler Lösungen, welche die hinsichtlich einer bestimmten Wichtung der Kostenkomponenten optimale Konfiguration darstellen.

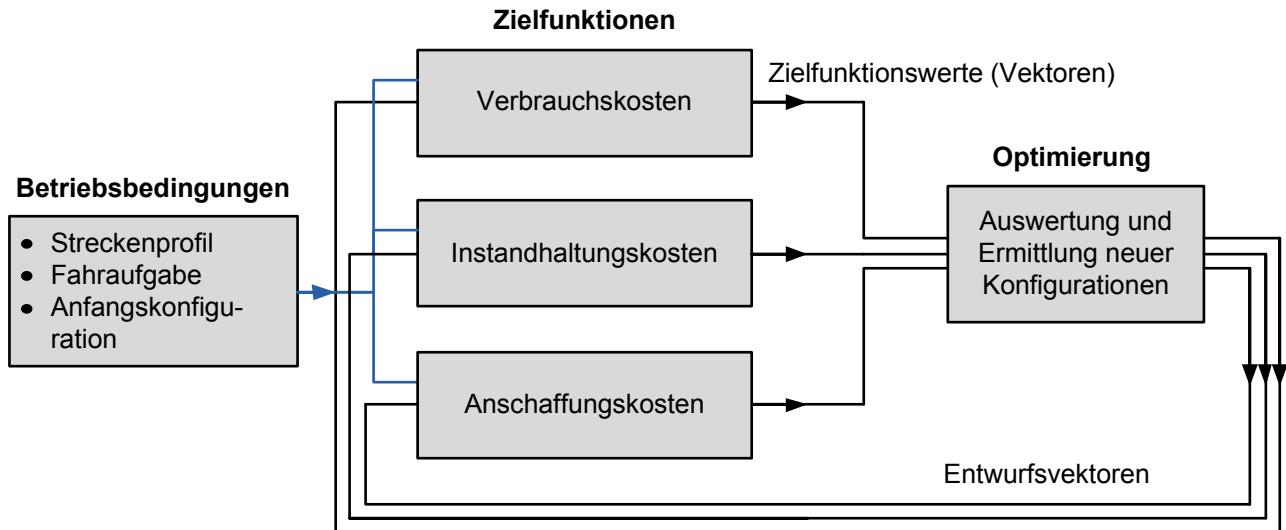


Abbildung 6-1: Schema der Verbesserung der LCC mit Hilfe der mehrkriteriellen Optimierung (nach [Zim11], S. 34)

6.2 Randbedingungen und Grenzen

Die nachfolgenden Betrachtungen gelten für den Betrieb von Fahrzeugen auf bekannten Strecken bzw. Streckentypen über den gesamten Projektionszeitraum. Dieselelektrische Lokomotiven haben den Vorteil eines relativ großen Einsatzspektrums. Für den Personenverkehr ausgelegte Fahrzeuge können für den Güterverkehr genutzt werden und umgekehrt. In der Regel werden Fahrzeuge für den Personenverkehr jedoch für ein bestimmtes Einsatzgebiet beschafft, in welchem die Fahrzeuge langfristig betrieben werden. Oft ist sogar eine relativ klare Zuordnung zu einer Zugkonfiguration und einer Strecke gegeben, wie das Beispiel der vom Betreiber Metronom eingesetzten dieselelektrischen Fahrzeuge auf der Strecke Hamburg-Cuxhaven zeigt. Eine Betrachtung des effizienten Speichereinsatzes für eine bestimmte Region oder bestimmte Strecken kann daher sinnvoll sein. Die Optimierung geht weiterhin von einer ungestörten Fahrt aus. Ein zu definierender Anteil der Fahrzeitreserve wird für die Optimierung genutzt und je nach Strecke und Betriebsbedingungen individuell verändert, um das wahrscheinlichste Szenario zu repräsentieren.

Die Betriebsdauer der Lokomotive für die LCC-Berechnung wird auf 20 Jahre festgelegt. Dies entspricht dem Betrachtungszeitraum der letzten Diesellokausschreibung der DB Regio [Kie09]. Die Lebensdauer kann jedoch wesentlich länger sein. In der Regel ist dann die Aufarbeitung oder der Austausch zumindest bestimmter Bestandteile der Lokomotive notwendig. Dies liegt zum einen daran, dass sonst bei steigenden Ausfallraten der Komponenten die Verfügbarkeit der Lokomotive sinkt. Zum anderen kann eine Modernisierung auf den Stand der Technik die Qualität der Lokomotive in Bezug auf Leistungsfähigkeit, Energieverbrauch, Lärm und Verschleiß steigern.

In dem aufgestellten LCC-Modell werden die Betriebsstoffe Motorschmieröl und die ggf. notwendigen Zusatzstoffe zum Erreichen neuer Abgasnormen nicht berücksichtigt.⁶⁵ Diese sind stark abhängig vom jeweiligen Dieselmotortyp und der Auslegung der Abgasnachbehandlung. Mit der erwarteten Verringerung der durchschnittlichen Leistung der Motoren bei Speichereinsatz ist jedoch von einer leichten Reduktion des Betriebsstoffverbrauchs auszugehen. Da die Kosten im Vergleich zu den Kraftstoffkosten relativ niedrig und quantitativ allgemein nicht bestimmbar sind, wird dieser Punkt bei der Optimierung vernachlässigt.

Ein weiterer Diskussionspunkt ist die mögliche Einschränkung der Fahrzeugverfügbarkeit. Bei der Anwendung von Speichersystemen für die Energierekuperation ist ein Ausfall des Speichersystems nicht kritisch für die Fahrzeugverfügbarkeit, da das Fahrzeug in der Regel auch ohne Speicher aufgrund der Fahrzeitreserve die Anforderungen erfüllen kann. Durch den modularen Aufbau von Speichersystemen werden beim Ausfall einzelner Zellen die Betriebseigenschaften des Speichers nur geringfügig verschlechtert.⁶⁶ Im Bereich Lokomotiven sind wegen des hohen Anteils elektrischer und dieselelektrischer Fahrzeuge Fachkundige für Arbeiten an Hochvoltanlagen an allen Standorten verfügbar. Diese können verhältnismäßig einfach an den Umgang mit elektrischen Energiespeichern herangeführt werden. Damit entfällt die aufwändige Weiterbildung von Mitarbeitern der Fertigung und Wartung zum „Fachkundigen für Arbeiten an hochvolteigensicheren Fahrzeugen“, wie sie z. B. in der Kraftfahrzeugbranche für Arbeiten an Hybrid- und Elektrofahrzeugen durchgeführt werden muss [Sch11b].

Weiterhin können viele Kenngrößen, insbesondere diejenigen, die sich auf die Kosten und die Lebensdauer von Batteriezellen beziehen, zwar in Zielfunktionen gefasst werden, jedoch sind deren Parameter mit Unsicherheiten behaftet. Diese resultieren daraus, dass die Datenbasis für die Approximation von Zielfunktionen zu klein ist, für die Abschätzung zukünftiger Entwicklung Annahmen oder bei der Aufstellung von Zielfunktionen Vereinfachungen getroffen werden müssen. Der Einfluss dieser Abweichungen wird mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 6.5 untersucht.

6.3 Mehrkriterielle Optimierung

6.3.1 Grundlagen

Die mehrkriterielle Optimierung wird angewendet, wenn ein System hinsichtlich mehrerer Eigenschaften verbessert werden soll. Der entstehende Zielfunktionsvektor repräsentiert die Kriterien, welche abhängig vom Problem sich bedingen, gegensätzlich oder voneinander unabhängig sind.

⁶⁵ Um die gestiegenen Anforderungen an die Emission von Rußpartikeln und NO_x zu erfüllen, müssen zum Erreichen der Abgasnorm Stage IIIb in Zukunft Partikelfilter und/oder SCR-Katalysatoren eingesetzt werden. Für letztere ist die Einspritzung von Harnstoff als Katalysator erforderlich [Kuh07].

⁶⁶ Das Versagen einer Zelle (nicht der normale Alterungsprozess) führt in der Regel zum Ausfall eines seriellen Zweigs. Beispielsweise besitzt bei der HP-Li-Ionen-Batterie Saft VL7P [Saf05a] ein serieller Zweig mit einer Nennspannung von ca. 600 V eine Nennkapazität von 4,175 kWh. Auf einer Lokomotive sind damit in der Regel mehrere parallele Stränge verbaut.

Zur Optimierung hat sich diese Methodik beim CAE-Entwurf komplexer Systeme wie Bahnsystemen [Met09] und der Strukturgenerierung von Bauteilen ([Sti10], [Oer09], [JKP+99]) als geeignet erwiesen.

Oft werden Probleme mit zumindest teilweise konkurrierenden Zielstellungen gestellt, weil das Ergebnis anderenfalls trivial ist. Bei unklarer Wichtung der Zielfunktionen ist die Suche nach einer einzelnen optimalen Lösung nicht zielführend, da die Information über den Zusammenhang zur Zielfunktion verloren geht. Ziel der mehrkriteriellen Optimierung ist es daher, verschiedene paretooptimalen Kompromisslösungen zur Verfügung zu stellen, welche das Optimum für verschiedene Wichtungen repräsentieren. Nachfolgend ist eine Lösung aus einer Region der Paretofront auszuwählen, welche die spezifizierten Ansprüche am besten erfüllt. Gleichzeitig ermöglicht der Vergleich mit benachbarten Lösungen eine Aussage zur Stabilität der Lösung gegenüber abweichenden Wichtungen der Zielfunktionen. Die Paretofront wird über die Zielfunktionsvektoren $\mathbf{z}(X_{\text{pareto}})$ der paretooptimalen Entwurfsvektoren definiert. Ein Entwurfsvektor x_{pareto} ist paretooptimal, wenn gilt, dass wenn ein beliebiger anderer Vektor x das Ergebnis einer Zielfunktion z_i verbessert, sich mindestens ein anderer Wert z_j verschlechtert:

$$\forall x : \left[\exists i : z_i(x_{\text{pareto}}) \geq z_i(x) \Rightarrow \exists j : z_j(x_{\text{pareto}}) \leq z_j(x) \right] \quad (6.1)$$

mit $x_{\text{pareto}} \in X_{\text{pareto}}$ und $\{z_i; z_j\} \subset z$

Abbildung 6-2 zeigt beispielhaft die Transformation aus dem Entwurfsparameterraum, aufgespannt durch x_1 und x_2 , in den Raum der Zielfunktionen (z_1 und z_2). Auf der rechten Seite ist die entstehende Paretofront dargestellt. Der Raum der Entwurfsparameter kann aus verschiedenen Gründen im Vorfeld limitiert werden, um ungültige Lösungen auszuschließen. Die Einhaltung von Nebenbedingungen, welche erst im Berechnungsprozess überprüft werden können, ist schwierig abzufangen. Vielversprechender als das Verwerfen des Entwurfsvektors ist der Einsatz einer Strafffunktion μ , welche die Verletzung von Ungleichheitsrestriktionen $g(x) \leq 0$ über die sanktioniert:

$$z_\mu(x_n) = z(x_n) + \mu[0, g(x)]. \quad (6.2)$$

Damit wird ein Problem mit Nebenbedingungen in ein Problem ohne Nebenbedingungen überführt. Im gegebenen Fall ist dies die resultierende Fahrzeugmasse, welche von den Entwurfsvariablen abhängt und Restriktionen aufgrund der Achslastbeschränkung für bestimmte Streckenklassen unterliegt. In diesem Fall kann die Strafffunktion dahingehend gedeutet werden, dass eine Masseüberschreitung durch einen Mehraufwand, z. B. den Einsatz von Leichtbaumaterialien oder eine aufwändiger konstruktive Gestaltung, kompensiert werden kann.

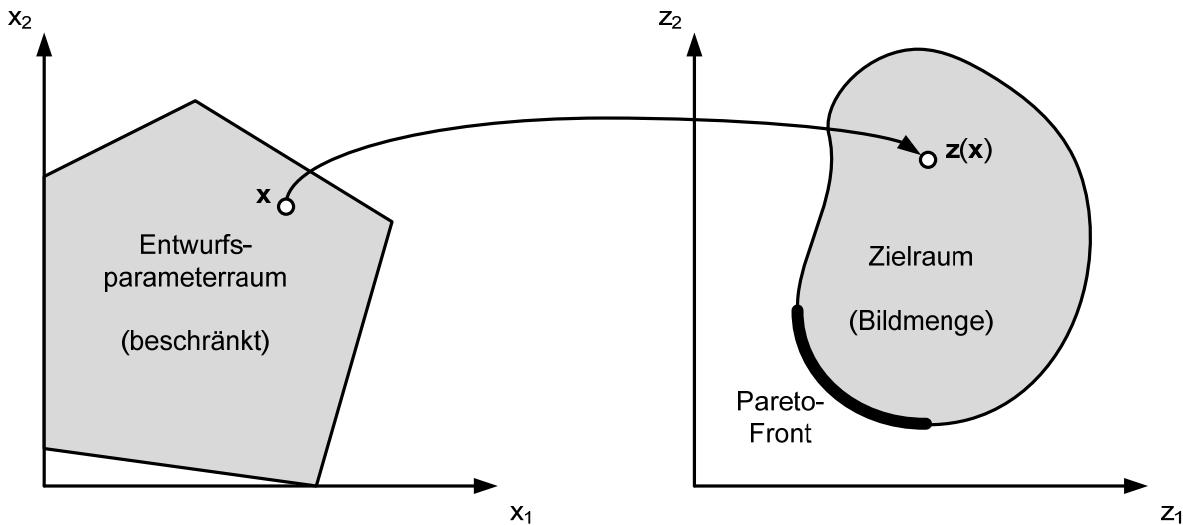


Abbildung 6-2: Pareto-Front ([SZB11], S. 5)

6.3.2 Anwendung auf die Problemstellung

Die benannten Kostenelemente der LCC können über die Kostenbetrachtung zu einem Wert zusammengefasst werden (Gesamtkosten). Jedoch kann eine separate Betrachtung hilfreich sein. Sie ermöglicht dem Anwender das Erkennen von Tendenzen bezüglich des Einflusses der Konfigurationsparameter auf die Kostenbestandteile und die Auswahl der optimalen Konfiguration bei vorgegebenen Gewichtungen der Einzelkriterien, wie sie zum Beispiel in Ausschreibungen von Betreibern angesetzt werden.

Die Kostenelemente sind über Zielfunktionen abgebildet. Diese können durch analytische Gleichungen, die Approximation von Kennfeldern und Simulationsergebnisse repräsentiert werden. Sie werden durch Veränderung der Entwurfsvariablen minimiert. Dafür müssen charakteristische Entwurfsvariablen gefunden werden, welche die Fahrzeugkonfiguration und den Speicherbetrieb in geeigneter Weise repräsentieren. Diese Variablen, z. B. die Nennleistung des Dieselmotors oder die nominelle Speichergröße, beschreiben die Zielfunktionen. Ein Algorithmus auf Basis der evolutionären Optimierungsstrategien kommt zur Minimierung der Zielfunktionen zum Einsatz. Alternativ werden Parametervariationen durchgeführt, um den Einfluss der Entwurfsvariablen auf die LCC-Kosten zu untersuchen.

6.4 Implementierung

6.4.1 Evolutionäre Algorithmen

Das vorgestellte Optimierungsproblem kann als globales und multikriterielles Optimierungsproblem klassifiziert werden. Die enthaltenen Zielfunktionen sind nichtlinear und nichtdifferenzierbar. Für diese Problemstellung hat sich die Nutzung von evolutionären Algorithmen im Vergleich zu klassischen deterministischen Ansätzen als günstiger erwiesen ([BNR06], [Poh00]). Evolutionäre Algorithmen arbeiten mit einer bestimmten Anzahl von Lösungen gleichzeitig. Diese können als Individuen betrachtet werden, welche eine Population bilden. Die natürlichen Mechanismen der Evolution, wie Selektion und Variation, werden als mathematische Algorithmen abgebildet und auf

die Population angewandt. Sie führen zur Erstellung einer neuen Generation von Individuen. Das Prinzip „Survival of the fittest“⁶⁷ wird über eine Fitnesszuweisung und ein anschließendes Selektionsverfahren umgesetzt. Damit wird sichergestellt, dass sich die Individuen bezüglich der Zielfunktionen verbessern.

Zunächst muss eine Anfangspopulation gebildet werden, mit welcher der Algorithmus gestartet wird. In der Regel wird dieser über den zulässigen Parameterraum zufällig verteilt. Die Tauglichkeit eines jeden Individuums wird geprüft und über einen Fitnesswert definiert. Dieser kann von dem Ergebnis der Zielfunktionen abweichen. Die Fitnesswerte werden für die folgende Selektion der Elternindividuen benutzt, welche Nachkommen erzeugen. Die ausgesuchten Individuen produzieren Nachwuchsindividuen über die evolutionären Operatoren Mutation und Rekombination. Die Umsetzung und Wirkung der Operatoren hängt vom verwendeten Optimierungswerkzeug und dessen Parametrierung ab. Verschiedene Umsetzungsvarianten sind bekannt und können mit verschiedener Wichtung und Reihenfolge angewandt werden ([Wei07], S. 47 ff.). Das gleiche gilt für den Prozess der Bestimmung der Fitnesslevel und der Selektion der Individuen ([Poh00], S. 13 ff.). Die Wahl und Parametrierung der Verfahren sind problemspezifisch. Es gilt, einen Kompromiss zwischen dem Selektionsdruck und dem Erhalt der Heterogenität zu finden. Dieser hat Auswirkungen auf die Rechenzeit und die Gefahr der Ermittlung lokaler Optima.

Mit dem Einfügen der neuen Individuen wird eine neue Population erschaffen. Diese wird ebenfalls hinsichtlich der Zielfunktionen berechnet, wobei verschiedene Abbruchkriterien zu prüfen sind. Neben der Güte der erreichten Zielfunktionswerte bzw. deren Konvergenz sind dies die Rechenzeit oder die Anzahl der berechneten Generationen. Der prinzipielle Optimierungsalgorithmus ist in Abbildung 6-3 dargestellt.

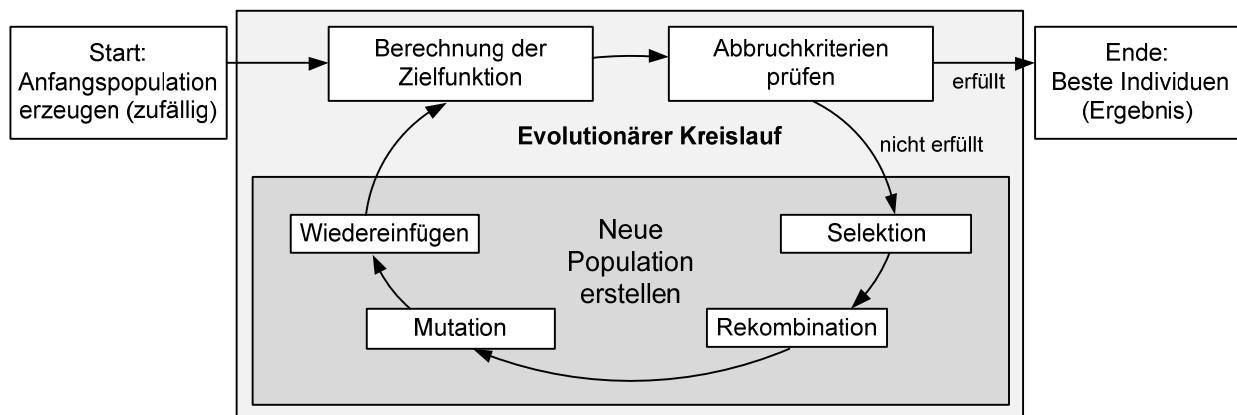


Abbildung 6-3 : Prinzip der evolutionären Algorithmen (nach [Poh00], S. 10, modifiziert)

⁶⁷ Der Begriff stammt aus der Evolutionstheorie und wurde von Herbert Spencer geprägt. Er beschreibt das „Überleben der Passendsten“.

6.4.2 Einbettung in die vorhandene Programmstruktur

Eine große Zahl von Optimierungsprogrammen auf Basis der evolutionären Algorithmen steht zur Suche von globalen Minima zur Verfügung. Einige von Ihnen sind auf bestimmte Anwendungen zugeschnitten (z. B. die Strukturanpassung von Tragflächen [KWH06]) oder sind direkt an CAE-Werkzeuge gekoppelt [JKP+99]. Die MATLAB Global Optimisation Toolbox wurde für diese Untersuchung ausgewählt, da sie komfortable Parametrierungsmöglichkeiten aufweist ([MAT11a], S. 5-69 ff.). Weiterhin kann sie einfach mit dem in MATLAB programmierten Hybrid Train Optimizer gekoppelt werden und bietet die Möglichkeit des parallelen Rechnens sowohl auf mehreren Prozessorkernen als auch auf verteilten Rechnern.

Ein limitierender Faktor für die Nutzbarkeit der evolutionären Algorithmen ist die Rechenzeit eines Durchlaufs der Energiesimulation. Diese ist primär abhängig von der Art der Speicheroptimierung, der zugestandenen Fahrzeitreserve, der Anzahl der Streckenparameter und der Streckenlänge. Letztere wirkt sich jedoch nur bei der Initialberechnung der sukzessiven Approximation aus (siehe Abschnitt 4.3.4). Ein linearer Zusammenhang zwischen Rechenzeit und Streckenlänge wird dadurch vermieden.

6.4.3 Auswahl von Entwurfsvariablen

Um geeignete Entwurfsvariablen zu finden, müssen die charakteristischen Parameter der Lokomotive und des Energiespeichers identifiziert werden. Dabei ist die Auswahl stark voneinander abhängiger Parameter möglichst zu vermeiden, da sie die Optimierung verlangsamen und keinen Informationsgewinn bringen.⁶⁸ Weiterhin werden nur Parameter betrachtet, die einen hinreichenden Einfluss auf die Kostenelemente besitzen.

Da die Bestimmung der optimalen Speicherkonfiguration im Mittelpunkt steht, wird nur ein Parameter für das Genset der Lokomotive verändert, die mechanische Nennleistung des Dieselmotors ($P_{V\text{KM}}$). In Bezug zu dessen Leistung sind Ansatzfunktionen für die Kosten und die Masse des Dieselmotors und des Generators implementiert. Gleichzeitig wird die Kurve des spezifischen Kraftstoffverbrauchs durch eine Approximationsfunktion mit den Parametern Leerlaufverbrauch und Volllastverbrauch angepasst.

Als relevante Parameter für die Auslegung des Energiespeichers wurden folgende Parameter ausgewählt:

- Nennenergieinhalt des Speichers (E_{nom}),
- spezifische gravimetrische Energie (E_{spez}),
- spezifische gravimetrische Speicherleistung (P_{spez}) und
- zulässige Schwankungsbreite des Speicherladezustands (DOD).

⁶⁸ Bei der Zusammenstellung eines Gensets kann z. B. die Generatorenennleistung unabhängig von der Dieselmotornennleistung gewählt werden. Dies führt aber zu einem vorhersehbaren Ergebnis.

Die Untersuchung ist auf Li-Ionen-Batterien beschränkt. Sie bieten eine genügend große spezifische Leistung und sind in der Lage, große Energiemengen aufzunehmen (Abschnitt 2.6). Die Untersuchung anderer Speichersysteme ist möglich, wenn für diese die entsprechenden Ansatzfunktionen erarbeitet werden.

Der Wert der zulässigen Entladetiefe hat einen signifikanten Einfluss auf den erwarteten kumulierten Ladungsumsatz bis zum Lebensende. Dieser steigt, wenn eine kleinere Schwankungsbreite gewählt wird (Abbildung A-1), denn die Zwischenspeicherung von Energie wird durch eine kleinere DOD kostengünstiger. Andererseits führt die Verringerung des Ladehubs zu größeren Speichern, was für die Massenbilanz der Lokomotive kritisch ist. Gleichzeitig steigen die Beschleunigungsarbeit und die Fahrzeit, falls die Boostfunktion des Speichers nicht genutzt wird.

Der nominelle Energieinhalt des Energiespeichers beeinflusst die Speichermasse und Speicher Kosten maßgeblich. Weiterhin werden diese Faktoren durch die spezifische gravimetrische Energie des Speichers bestimmt. Kommerzielle Lithium-Ionen-Batterien weisen derzeit eine spezifische Energie zwischen 40 Wh/kg und 160 Wh/kg auf. Eine hohe spezifische Energie ist in der Regel mit einer schlechten spezifischen Leistung gekoppelt. Durch Analyse mehrerer Datenblätter und veröffentlichter Ragone-Diagramme, welche die Beziehung zwischen spezifischer Energie und Leistung zeigen, konnten die Ansatzfunktionen für die Beziehung zwischen diesen Parametern in Abhängigkeit vom Betriebsfall aufgestellt werden (Abbildung 6-4). Dies ermöglicht es, beide Größen in einem Parameter abzubilden.

6.4.4 Aufstellung der Zielfunktionen

Die Zielfunktionen für die Optimierung sind die Anschaffungskosten, die Instandhaltungskosten und die Verbrauchskosten über der Lebensdauer der dieselelektrischen Lokomotive (Abschnitt 6.3.2). Die Anschaffungskosten können vom Preis der Referenzkonfiguration abgeleitet werden. Der Betrag wird um die Alternativkosten für die abgeleitete Lokkonfiguration ergänzt, welche sich aus den Dimensionierungsparametern der Lokomotive ergeben. Die Instandhaltungskosten setzen sich aus den Aufwendungen für die Referenzlokomotive und das Speichersystem⁶⁹ zusammen. Dessen Lebensdauer ist durch energiedurchsatzbasierte und betriebsbedingte Grenzen gekennzeichnet (4.52). Die Verbrauchskosten werden aus den jährlichen Betriebsstunden der Lokomotive $t_{\text{Betrieb,ges}}$, der verbrauchten fahrzeitbezogenen Kraftstoffmasse $m_{K_r, \text{Fahrt}}$, der korrespondierenden Fahrzeit t_{Fahrt} , der Kraftstoffdichte ρ_{K_r} und den volumenbezogenen Kraftstoffkosten $K_{K_r, \text{spez}}$ ermittelt:

$$K_{\text{Verbrauch}} = \frac{m_{K_r, \text{Fahrt}}}{\rho_{K_r}} \cdot \frac{t_{\text{Betrieb,ges}}}{t_{\text{Fahrt}}} \cdot K_{K_r, \text{spez}}. \quad (6.3)$$

⁶⁹ Da ein Speichersystem in der Regel wartungsfrei gestaltet ist und sich selbst überwacht, sind die Wartungskosten für das Speichersystem primär durch den Austausch der Speicher determiniert. Je nach Auslegung fallen jedoch gegebenenfalls Wartungskosten für das Temperierungssystem, wie z. B. einer Klimaanlage, an.

Die detaillierten Zielfunktionen wurden in der Diplomarbeit von ZIMMERMANN [Zim11] aufbereitet (siehe Anhang Abbildung B-3).

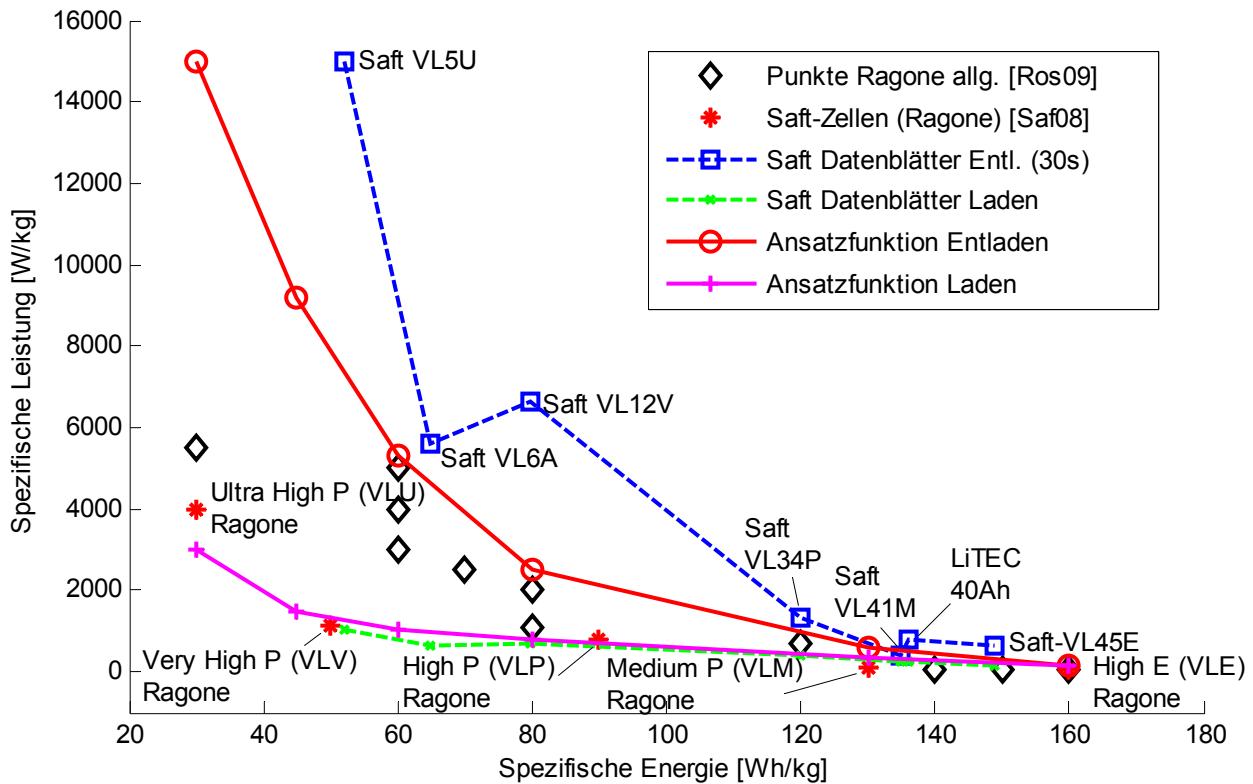


Abbildung 6-4: Ableitung der Ansatzfunktionen für die Leistungsparameter von Li-Ionen-Speichern (nach [Zim11], [Saf08], [Ros09])

6.5 Sensitivitätsanalyse

6.5.1 Vorgehen

Neben den untersuchten Entwurfsvariablen werden für die mehrkriterielle Optimierung Eingangsparameter vorgegeben, welche einen großen Einfluss auf das Ergebnis haben. Sie sind in der Regel durch die Fahraufgabe und die Umgebungsbedingungen determiniert. Nicht alle Eingangsparameter sind im Vorfeld genau bestimmbar. Die Kenntnis über den Einfluss der Parameter kann helfen, die Gültigkeit der Ergebnisse für abweichende Szenarien abzuschätzen. Dies wird auch in der zugehörigen DIN gefordert [DIN04].

Die Einflussgrößen werden in einer Parameterstudie auf Basis einer Referenzkonfiguration betrachtet. Daraus können nur qualitative Aussagen abgeleitet werden, da jeweils nur ein Parameter variiert und damit der Effekt einer Parametervariation in anderen Arbeitspunkten nicht untersucht wird. Das Probieren aller Parameterkombinationen ist jedoch zu aufwändig. Es werden streckenspezifische, fahrzeugspezifische, ökonomische und Parameter der Betriebsstrategie auf ihre Signifikanz untersucht. Die berücksichtigten Parameter für die Variation und die Referenzkonfiguration sind in Tabelle 6-1 aufgeführt. Als einfach nachvollziehbare Basis wurde ein flaches Streckenstück mit einem Haltestellenabstand von zehn Kilometern verwendet (Abbildung 4-30). Die Mehrfahrzeit ist

auf einen Wert eingestellt, welcher vier Prozent Fahrzeitreserve bei der Referenzkonfiguration entspricht.

Tabelle 6-1: Darstellung der untersuchten Einflussgrößen mit den entsprechenden Stützstellen

Parameter	1	2	3 (Referenz)	4	5
Strecken- und umgebungsspezifische Parameter					
Haltestellenabstand [km]	5	7,5	10	15	20
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	75	100	120	140	160
Steigung [1/1000]	-6	-3	0	3	6
abgeforderte Nebenaggregateleistung [kW] ⁷⁰	50	100	200	300	350
Fahrzeugspezifische Parameter					
Skalierung Fahrwiderstand [-]	0,8	0,9	1	1,1	1,2
Wagenzahl (inklusive Steuerwagen) [-]	3	4	5	6	7
Spezifische Energie [Wh/kg]	40	60	80	120	160
Nennenergie [kWh]	50	100	200	500	800
VKM-Leistung [kW]	2000	2100	2200	2300	2400
Skalierung Innenwiderstand [-]	0,5	0,75	1	1,5	2
Ökonomische Randbedingungen					
Kraftstoffkosten [€/l]	0,8	1	1,2	1,8	2,4
Skalierung Speicherkosten [-]	0,5	0,75	1	1,5	2
Skalierung Übergewichtsfaktor [-]	0,5	0,75	1	1,5	2
Parameter Betriebsstrategie					
DOD [%]	2,5	5	10	15	30
Fahrzeitreserve [%]	0	2	4	6	8

Der Einfluss der Parameter auf die einzelnen Kostenfunktionen und die ungewichteten addierten Gesamtkosten ist in Abbildung 6-5 dargestellt. Das Diagramm zeigt die Differenz der Maximal- und Minimalwerte der Kostenelemente innerhalb der definierten Spannbreite der Stützstellen. Der Wert ist über das Ergebnis für zwei Speicherbetriebsstrategien (kraftstoffoptimale dynamische Programmierung und eine regelbasierte Betriebsstrategie) gemittelt. Dabei zeigt sich, dass es große Unterschiede in der Signifikanz der Parameter bezüglich der Gesamtkosten, aber auch in der Auswirkung der Parameter auf die verschiedenen Kostenelemente gibt, welche im Folgenden diskutiert werden.

⁷⁰ Die Nebenaggregateleistung wird vom Leistungsumsatz des Zugenergieversorgungswechselrichters dominiert, welcher primär durch den Betrieb der Klimatisierungssysteme in Abhängigkeit von den klimatischen Randbedingungen abhängt.

6.5.2 Strecken- und umgebungsspezifische Einflussgrößen

Die strecken- und umgebungsspezifischen Parameter besitzen einen großen Einfluss auf die Verbrauchskosten. Es ist zu erkennen, dass dies insbesondere für die Höchstgeschwindigkeit und die Streckenneigung gilt. Die große Abhängigkeit der Verbrauchskosten von der Streckenneigung sollte jedoch nicht überbewertet werden, da sich diese bei der Hin- und Rückfahrt zum Teil ausgleichen. Die Reduktion des Haltestellenabstands und eine Erhöhung der zulässigen Geschwindigkeit haben eine Steigerung der Instandhaltungskosten zur Folge, weil häufiger Rekuperationsphasen auftreten und der Energieumsatz des Energiespeichers zunimmt. Dieser muss damit öfter ersetzt werden. Gleichwohl steigt das Einsparpotential durch die Rekuperation an, was den Effekt in der Regel überkompenziert.

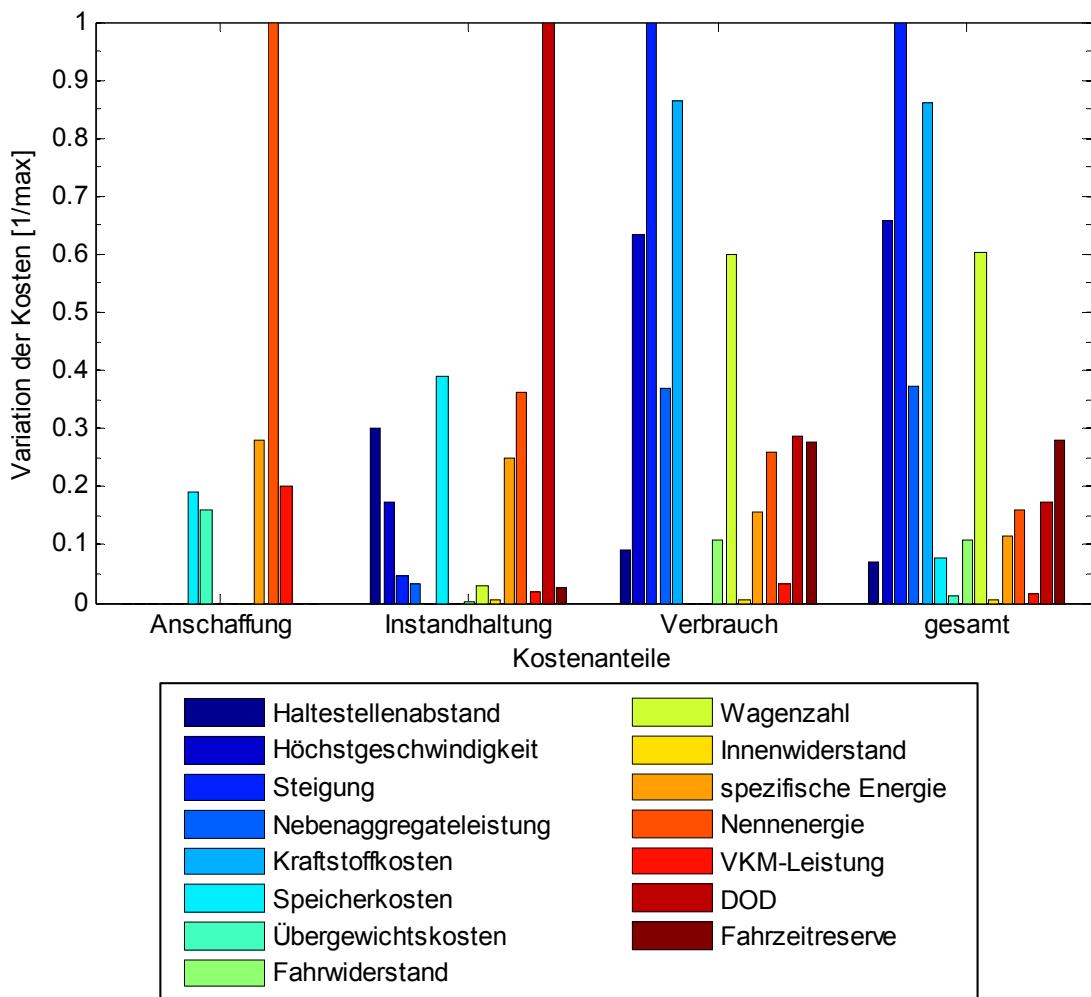


Abbildung 6-5: Auswirkung der Parametervariation auf die einzelnen Kostenbestandteile (Maximaldifferenz)

Es wird geschlussfolgert, dass die Streckenparameter bei der LCC-Bewertung exakt definiert werden müssen, da sie für die Wichtung der anderen Kostenbestandteile von großer Bedeutung sind. Dies kann sich zum Beispiel auf eine Investitionsentscheidung in energiesparende Technologien auswirken. Dabei spielt natürlich auch die Einsatzdauer des Fahrzeugs, die hier mit elf Stunden pro

Tag angesetzt wird, eine Rolle. Die genauen Ergebnisse der Rechnung und die resultierenden Verläufe können im Anhang in Abbildung C-10 nachvollzogen werden.

Charakteristisch ist weiterhin der relativ große Anteil der Nebenaggregateleistung an den Verbrauchskosten. Zur Generierung realistischer Verbrauchsergebnisse müssen diese berücksichtigt werden. Da sie relativ stark von den Wetterbedingungen abhängig und damit jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen sind, sollten für Verbrauchsbelastungen Mittelwerte angenommen werden.

6.5.3 Ökonomische Randbedingungen

Der Einfluss der Annahmen für die Entwicklung der Kraftstoff- und Speicherpreise auf die Gesamtkosten ist ebenfalls hoch. Bei den Kraftstoffkosten ist dies durch den linearen Zusammenhang zu den dominanten Verbrauchskosten begründet. Die Speickerkosten haben Auswirkung auf die Anschaffungs- und besonders die Instandhaltungskosten des Systems. Bei der gewählten Grundkonfiguration muss der Speicher innerhalb der Lebensdauer von 20 Jahren voraussichtlich achtmal getauscht werden. Die Unsicherheit bei beiden Kostenfaktoren ist immanent, da Prognosen nur auf der Basis von Zukunftsszenarien getroffen werden können. Diese sind insbesondere von der Entwicklung in wirtschaftspolitisch unbeständigen Regionen abhängig, die schwer vorhersagbar ist.

Über die Variation des Faktors der Speickerkosten ist es möglich, die Auswirkung einer veränderten Speicherlebensdauer zu untersuchen. Diese besitzt den gleichen Einfluss auf die Kostenfunktionen. Bezuglich der Speicherlebensdauer kann sich der Betreiber auf Basis eines definierten Einsatzprofils gegenüber dem Fahrzeughersteller und dieser gegebenenfalls gegenüber dem Speicherhersteller absichern.

Der Masseausgleichskostenfaktor repräsentiert zusätzliche Aufwendungen, welche bei Überschreiten der zulässigen Achsmasse durch eine notwendige Massereduktion oder bei großen Speichern gegebenenfalls durch den Einsatz eines Tenders entstehen [ERI11]. Eine Erhöhung dieses Kostenfaktors bewirkt eine Tendenz zu kleineren Speicherlösungen.

6.5.4 Fahrzeugspezifische Parameter

Die fahrzeugspezifischen Kenngrößen beinhalten die Optimierungsparameter Antriebsleistung, spezifische Energie und Nennenergie. Jede dieser Größen beeinflusst sowohl die Verbrauchs- als auch die Instandhaltungskosten nachhaltig (Abbildung C-11). Die spezifische Energie der Speicherzellen, die Nennenergie und die VKM-Leistung definieren zudem die Anschaffungskosten.

Der große Einfluss der Wagenzahl im Zugverband auf die Verbrauchskosten zeigt, dass der bedarfsgerechte Einsatz von Wagen energetisch und ökonomisch zweckmäßig ist. Der Kraftstoffverbrauch sinkt dabei nicht nur durch die Reduzierung des Leistungsbedarfs zur Überwindung der Fahrwiderstände, sondern auch durch die bessere Beschleunigung. Diese ermöglicht die verstärkte Nutzung der energieeffizienten Fahrweise in Ausrollphasen bei gleicher Fahrzeit.

Der Innenwiderstand der Batteriezellen bestimmt die Speicherverluste und hat damit einen geringen Einfluss auf die Verbrauchskosten. Mit einem Lade- und Entladewirkungsgrad von jeweils über 90 Prozent weisen die Batteriespeicher geringe Verluste auf, jedoch ergibt sich eine relativ große Schwankungsbreite durch die hohe zulässige Steigerung des Innenwiderstandes für die Definition des Lebensdauerendes.

6.5.5 Parameter der Betriebsstrategie

Bezüglich der Betriebsstrategie werden die Kenngrößen Entladetiefe (DOD) und die zugestandene Fahrzeitreserve variiert. Die DOD bestimmt maßgeblich die Instandhaltungs- und Verbrauchskosten. Während eine geringe DOD die Instandhaltungskosten herabsetzt, sinken mit zunehmender DOD die Verbrauchskosten. Die genaue Lage des Optimums ist dabei von den anderen Randbedingungen der LCC-Berechnung abhängig.

Der Einfluss der Fahrzeitreserve auf die Verbrauchskosten ist, wie bereits in Abschnitt 4.3 diskutiert, sehr hoch (Abbildung 6-6). Für die Instandhaltungskosten, die hier insbesondere von der Speicheralterung abhängig sind, spielt die Fahrzeitreserve jedoch kaum eine Rolle, weil der Speicher in der Grundkonfiguration nicht auf eine vollständige Rekuperation der Bremsarbeit ausgelegt ist.

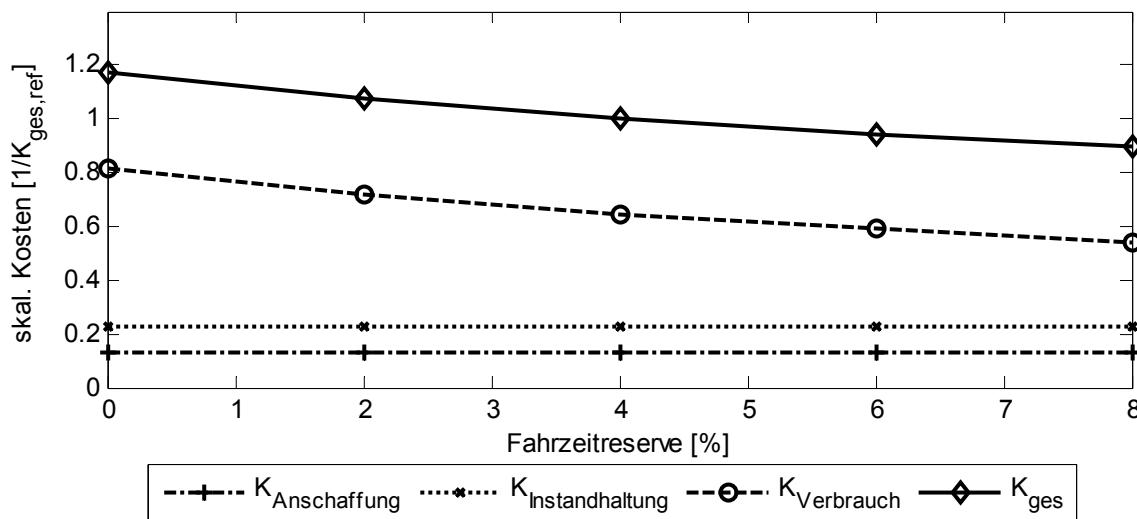


Abbildung 6-6: Einfluss der Fahrzeitreserve auf die Bestandteile der LCC

6.5.6 Schlussfolgerung

Die Sensitivitätsanalyse zeigt die insgesamt große Abhängigkeit der Ergebnisse von den Modellparametern, die der Berechnung zu Grunde liegen. Bei Systemen mit nichtlinearem Verhalten ist die vorgestellte Methode der Variation eines Parameters betriebspunktabhängig. Für die ausgewählte Entwurfsvariante sollte eine solche Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, um die Unwägbarkeiten der Berechnung transparent zu machen. Das gilt insbesondere für die Kostenprognose des Dieselskraftstoffs und des Energiespeichers, die einer großen Unsicherheit unterworfen sind.

6.6 Untersuchung der speicherrelevanten Parameter mit Hilfe einer Parametervariation

Im Folgenden wird eine Parametervariation bezüglich der speicherrelevanten Entwurfsparameter vorgestellt. Ziel ist die Identifikation von Abhängigkeiten im Entwurfsraum und eine Evaluierung der Möglichkeiten einer solchen erschöpfenden Suche. Alle Kombinationen der in Tabelle 6-1 dargestellten Parameter wurden berechnet, dies entspricht 560 Rechnungen.

Tabelle 6-2: Darstellung der Einflussgrößen mit entsprechenden untersuchten Werten

Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spezifische Energie [Wh/kg]	40	60	80	100	120	140	160			
Nennenergie [kWh]	40	60	80	100	200	300	400	500	750	1000
DOD [%]	2	4	6	8	10	15	20	30		

Aus den Ergebnissen für die Kostenbestandteile des LCC erfolgt der Aufbau der Front von paretooptimalen Konfigurationen (Abbildung 6-7). Sie ergibt sich aus den Argumenten der Minima einer Linearkombination der Zielfunktionen:

$$x_{\text{pareto}}(k) = \arg \min_{x \in X_{\text{zul}}} \left(k_1 \cdot K_{\text{Anschaffung}}(x) + k_2 \cdot K_{\text{Instandhaltung}}(x) + k_3 \cdot K_{\text{Verbrauch}}(x) \right) \quad (6.4)$$

mit $\{k_1, k_2, k_3\} \subset [0, 10] \subset \mathbb{N}$.

Durch die unterschiedliche Gewichtung der Kostenelemente ergeben sich verschiedene Lösungen. Die Grundrelation zwischen den Kostenbestandteilen bleibt erhalten. Es entsteht somit eine Tendenz zu verbrauchsgünstigen Entwurfsvektoren. Abbildung 6-7 zeigt die ermittelte Häufigkeit des Auftretens bestimmter Entwurfsvektoren. Sie ist durch die Größe der Kreise gekennzeichnet. Bei der Auswertung fällt auf, dass eine Auslegung auf die maximal mögliche Rekuperationsenergie bevorzugt wird. Diese spiegelt sich in der Hyperbelform des dominanten Zusammenhangs zwischen DOD und nominaler Speicherenergie wieder. Eine ähnliche Tendenz zeigt sich im Zusammenhang zwischen DOD und spezifischer Energie. Geringere Werte für die spezifische Energie können durch eine größere DOD z. T. ausgeglichen werden.

Im Zusammenhang zwischen Nennenergie und spezifischer Energie zeigt sich eine Dominanz von Speichern mit einer spezifischen Energie im Bereich von 100 bis 120 Wh/kg. Die breitere Streuung für kleinere Speichergrößen entsteht durch die Ergebnisse für eine hohe Gewichtung der Anschaffungskosten. Dabei wird ein kleiner nomineller Speicherinhalt bei hoher spezifischer Energie bevorzugt, da etwas niedrigere Investitionskosten auftreten.

Es kann eine Lösung identifiziert werden, die für ca. 34,8 Prozent der Kombinationen als günstigste Lösung heraussticht. Sie ist durch eine spezifische Energie von 100 Wh/kg gekennzeichnet, was dem Wert einer High-Power-Zelle entspricht, welche die richtige Zeitkonstante für das untersuchte Fahrspiel aufweist. Die 750 kWh Nennenergie bei einem DOD von 6 Prozent ergeben eine nutzbare Energiemenge von 45 kWh. Der Speicherverschleiß ist gleichzeitig relativ gering. Die Spei-

chermasse von 12,5 t (inklusive Temperierungssystem und die elektrische und mechanische Integration) würde jedoch einen Tender notwendig machen. Ob eine solche Lösung vom Markt angenommen wird, muss geprüft werden. Die Kosten für einen Tender sind durch die angesetzten Strafkosten von ca. 460.000 € in jedem Fall gedeckt ([ERI11], S. 45).

Fazit der Untersuchung ist, dass ein solches Suchverfahren für eine geringe Anzahl an Entwurfsparametern mit vertretbarem Aufwand durchführbar ist. Die Ergebnisse sind adäquat auswertbar. Im Anschluss an die Untersuchung könnte der Bereich um die bevorzugte Lösung feiner diskretisiert werden, um noch bessere Aussagen zu erhalten. Sollten durch Festlegung auf einen Lieferanten oder andere Restriktionen nur eine begrenzte Auswahl an Speichertypen und gegebenenfalls bereits festgelegte Größenabstufungen zur Verfügung stehen, stellt die erschöpfende Suche eine effiziente Methode der Optimierung dar. Die Anwendung der erschöpfenden Suche hat ihre Grenzen, wenn sich die Anzahl der Entwurfsparameter vergrößert. Der Aufwand steigt mit der Anzahl der Entwurfsparameter exponentiell an.

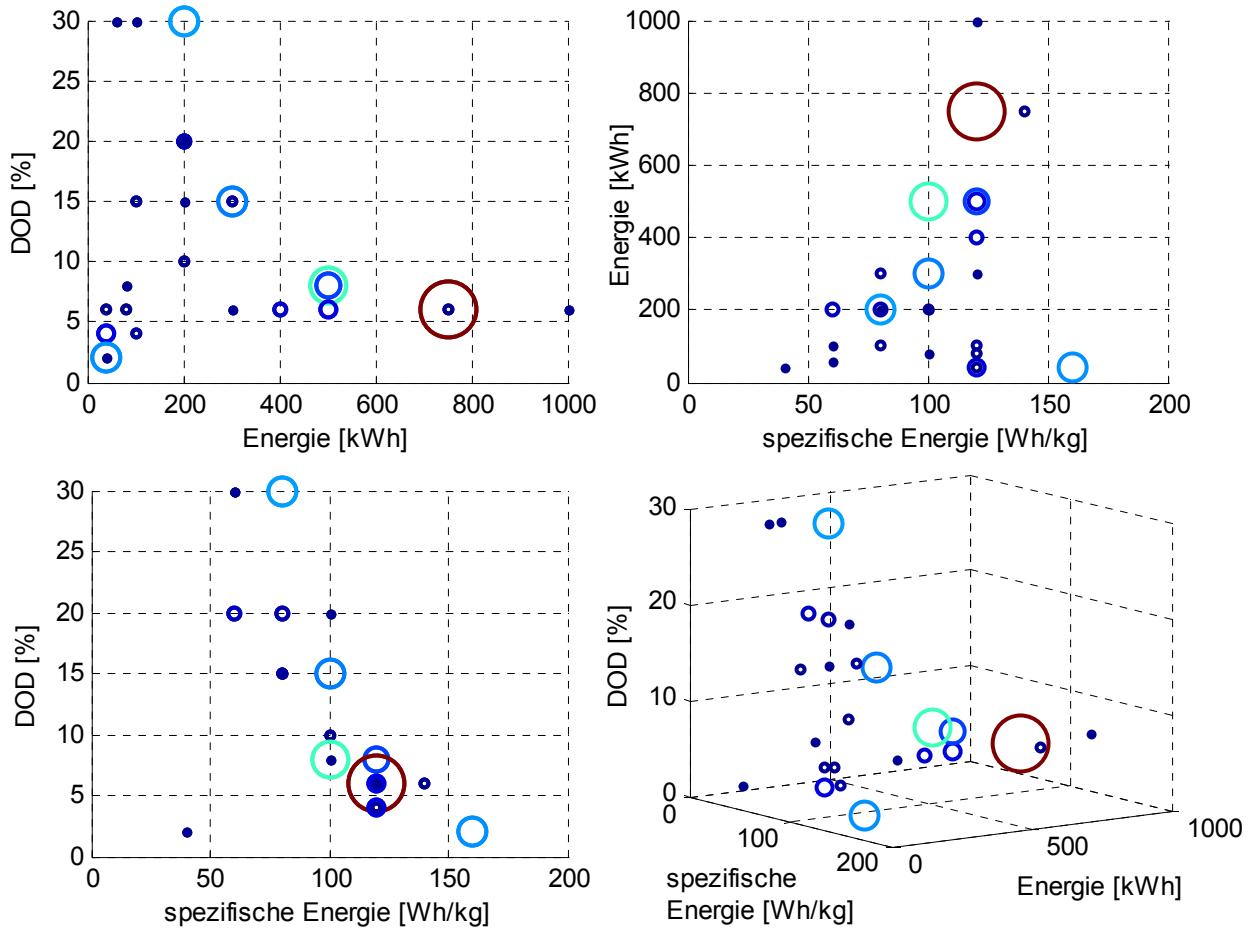


Abbildung 6-7: Optima diskreter Werte aus der erschöpfenden Suche für verschiedene Gewichtungen der LCC

6.7 Anwendung evolutionärer Algorithmen

Durch die Anwendung der evolutionären Algorithmen entfallen die Einschränkungen der Diskretisierung des Entwurfsbereichs. Damit können unter Umständen bessere Optimierungsergebnisse erzielt werden. Weiterhin kann bei einer größeren Zahl von Entwurfsparametern die Anzahl der notwendigen Berechnungen reduziert werden, da nicht mehr der gesamte Suchraum in einem Raster abgetastet werden muss. Die Möglichkeiten der Anwendung sollen an einem Berechnungsbeispiel verdeutlicht werden.

6.7.1 Entwurfsraum

Zunächst ist ein Entwurfsraum zu definieren, in dem eine mögliche Lösung liegen kann. Dafür wird der in Abschnitt 6.4.3 hergeleitete Entwurfsvektor

$$\boldsymbol{x} = \begin{pmatrix} P_{\text{mech}} \\ E_{\text{ges}} \\ E_{\text{spez}} \\ \text{DOD} \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \dots \text{Antriebsleistung} \\ \dots \text{Gesamtenergie} \\ \dots \text{spezifische Energie} \\ \dots \text{Entladetiefe} \end{array} \quad (6.5)$$

gewählt. Einschränkungen können sich durch Forderungen des Kunden, der Verfügbarkeit von Komponenten und Einschränkungen im Gültigkeitsbereich der getroffenen Zielfunktionen ergeben. Eine Forderung von Seiten des Betreibers kann beispielsweise darin bestehen, dass eine Leistung dauerhaft bereitstehen muss. Dies beschränkt den Entwurfsbereich der Antriebsleistung, da diese nicht über einen längeren Zeitraum durch den Energiespeicher substituiert werden kann. Weiterhin ist die zulässige Fahrzeugmasse beschränkt. Wenn gleichzeitig ein zusätzlicher Tender ausgeschlossen ist, muss der Entwurfsbereich (z. B. durch die Gesamtenergie des Speichers) eingeschränkt werden.

Bezüglich des Ladehubs bietet sich für Hybridanwendungen die Festlegung einer oberen und unteren Grenze an, um schlechte Werte im Vorfeld herauszufiltern. Abbildung 6-8 zeigt einen beispielhaften Entwurfsbereich und eine eingezeichnete Beispielkonfiguration. Die Werte werden skaliert und dem Optimierungsalgorithmus übergeben.

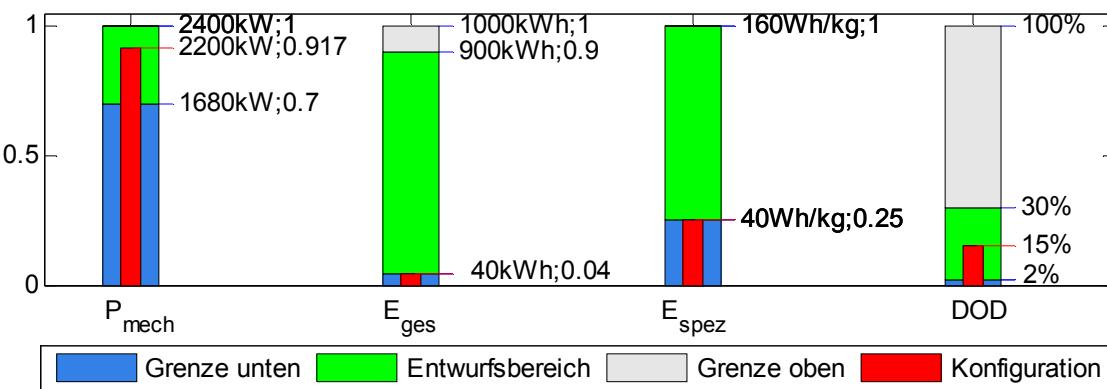


Abbildung 6-8: Entwurfsbereich und Beispielkonfiguration

Für die Optimierung wurde ein Streckenabschnitt gewählt, welche einen charakteristische Merkmale einer Regionalexpress-Strecke (maximale Streckengeschwindigkeit 140 km/h, mittlerer Haltestellenabstand 10 km) aufweist (Abbildung 6-9).

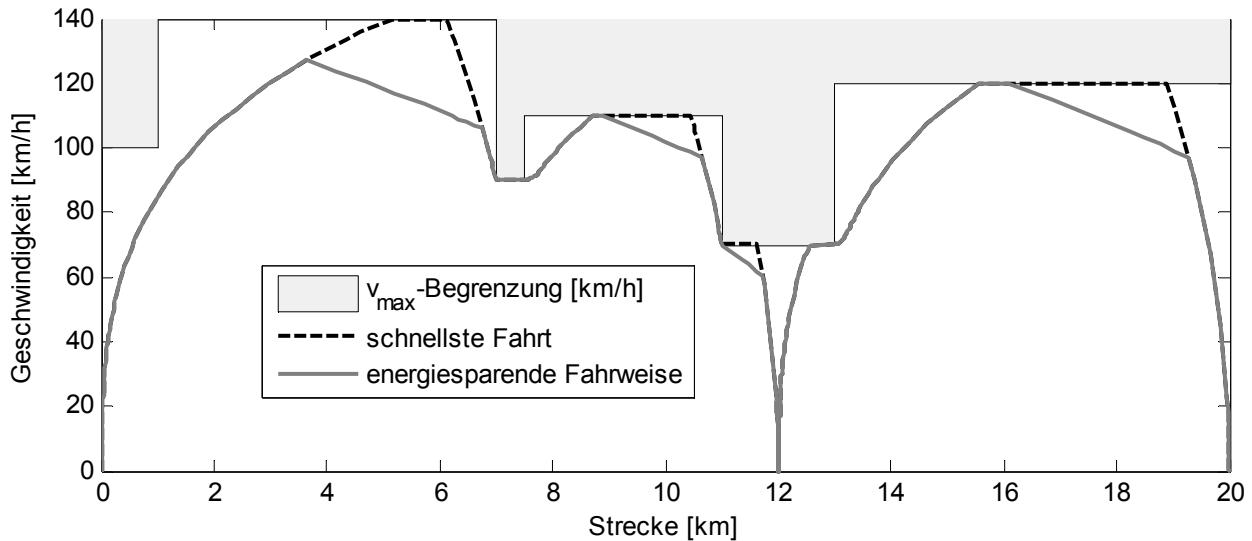


Abbildung 6-9: Verwendetes Streckenprofil

6.7.2 Mehrzieloptimierung

Die Durchführung der Mehrzieloptimierung erfolgt nach dem in Abschnitt 6.4 vorgestellten Konzept. Es wurde eine Populationsgröße von 60 gewählt. Die Anforderungen an die Konvergenz der Lösung wurden im Beispiel nach 140 Generationen erfüllt. Durch die mögliche Parallelisierung kann der Rechenaufwand minimiert werden. Bei einer Rechenzeit von 80 bis 180 Sekunden pro Individuum entsteht eine Rechenzeit von 35 Stunden (Nutzung von 8 Kernen einer Intel Xeon CPU X5550 mit 2,67 GHz).

Während der Optimierung lassen sich nach der Berechnung einer Generation die Kennwerte wie der Abstand die Diversität der Entwurfsvektoren, die von der derzeitigen Population erreichten Zielfunktionswerte und die Ausbildung der Paretofront darstellen. Abbildung 6-10 zeigt die finale Paretofront, wobei zur besseren Anschaulichkeit die Punkte über eine Fläche verbunden sind. Diese ist durch eine kubische Interpolation entstanden und nicht Teil der Lösungsmenge. Die Fläche ist so eingefärbt, dass die Gesamtkosten sichtbar werden. Dabei tritt die Dominanz der Verbrauchskosten hervor, die für dieselektrische Fahrzeuge aufgrund der hohen Kraftstoffkosten typisch ist. Hervorgehoben ist das beste Ergebnis bei gleicher Wichtung der Zielfunktionswerte und das Ergebnis für eine hohe Wichtung der Anschaffungskosten⁷¹.

⁷¹ In diesem Fall 70 Prozent Anschaffungskosten, 15 Prozent Instandhaltungskosten und 15 Prozent Verbrauchskosten.

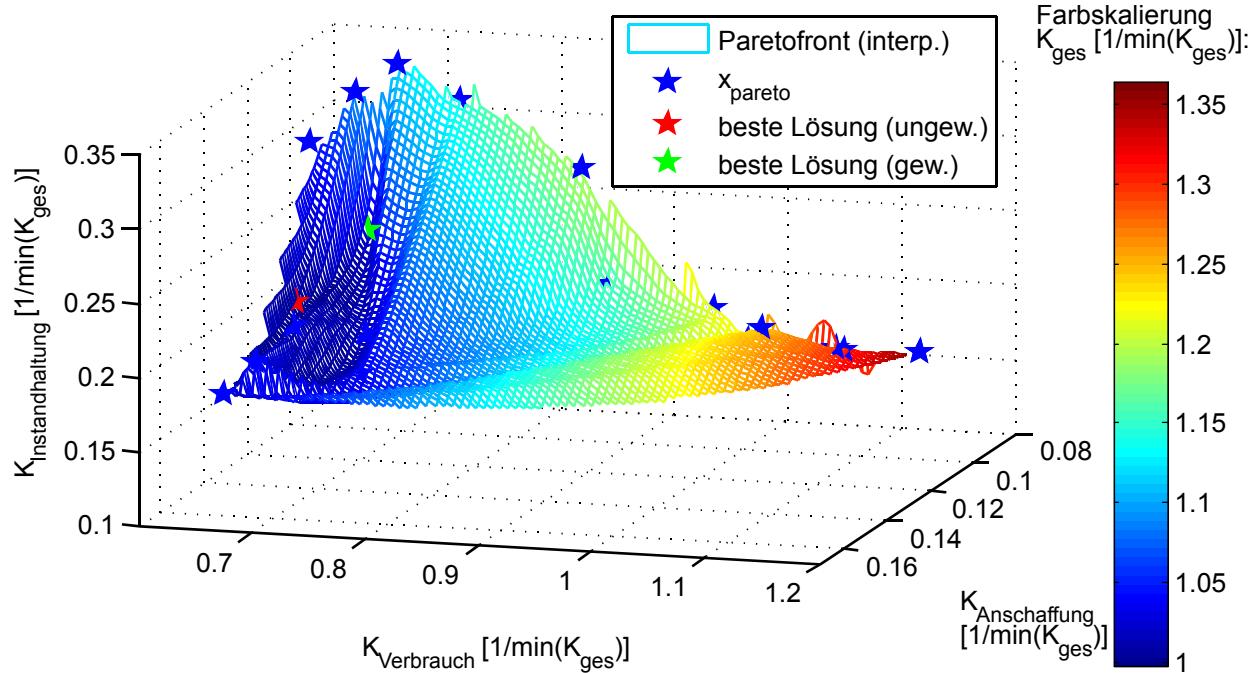


Abbildung 6-10: Paretofront

Für die Ergebnisinterpretation im Hinblick auf die dazugehörigen Entwurfsvektoren ist die Ansicht von der Seite besser geeignet. Die Abbildung des dann fehlenden Bestandteils Verbrauchskosten erfolgt über die Farbgebung des Punktes. Ein quer liegender Balken stellt die ungewichteten Gesamtkosten dar. Die Entwurfsvektoren werden entsprechend der in Abbildung 6-8 vorgestellten Nomenklatur normiert dargestellt. Anhand dieser können die Tendenzen der Speicherauslegung evaluiert werden, wie sie bereits in Abschnitt 6.6 besprochen wurden. Für den hinzugenommenen Parameter der Leistung lässt sich ableiten, dass große Dieselmotoren bei dem hier vorliegenden niedrigen Leerlaufanteil effizienter zu betreiben sind, da sie eine schnelle Beschleunigung und bei gleicher Fahrzeit entsprechend längere Rekuperationsphasen bieten. Dagegen sprechen die höheren Anschaffungskosten. Die Tendenz wird auch in Abbildung 6-12 deutlich. Dort sind die hinsichtlich einer Entwurfsgröße sortierten paretooptimalen Entwurfsvektoren mit den korrespondierenden Kostenbestandteilen aufgetragen. Anders als bei Parametervariationen, bei denen nur ein Parameter gestellt wird, entstehen dabei keine glatten Kurven.

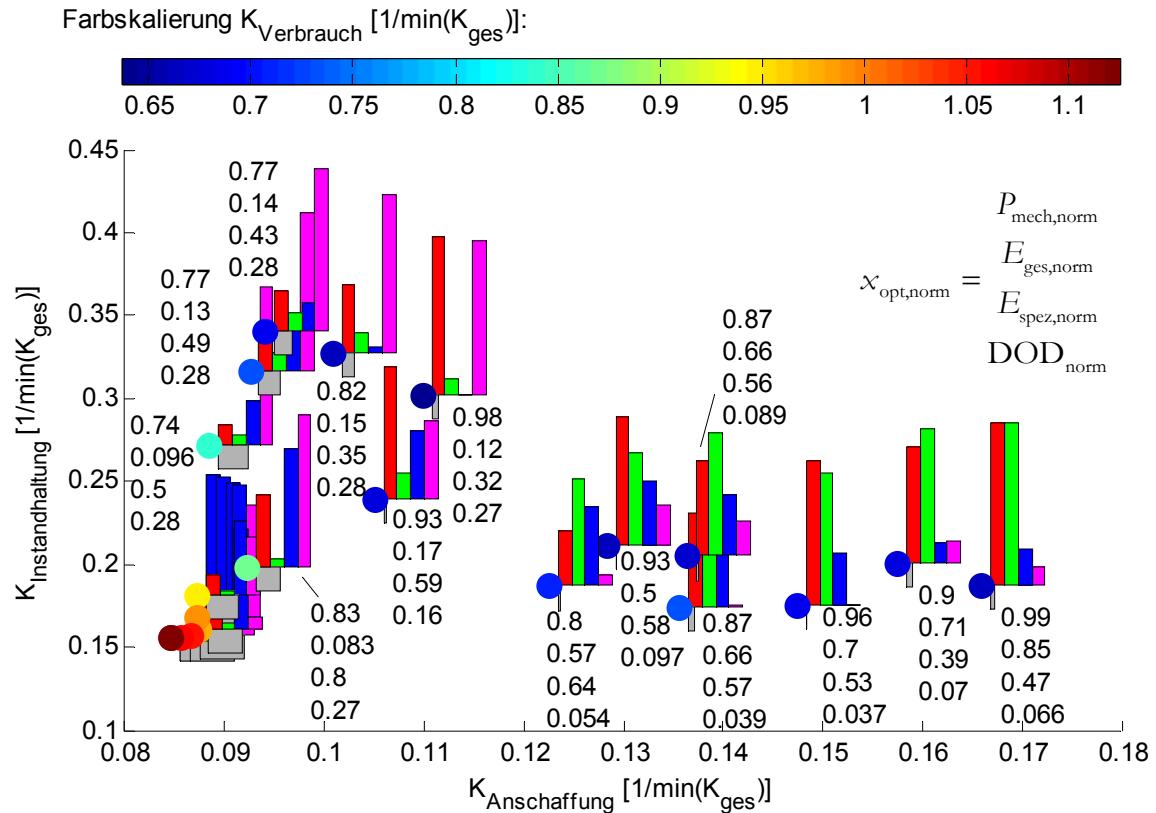


Abbildung 6-11: 2D-Ansicht der Paretofront mit Darstellung ausgewählter normierter Entwurfsvektoren

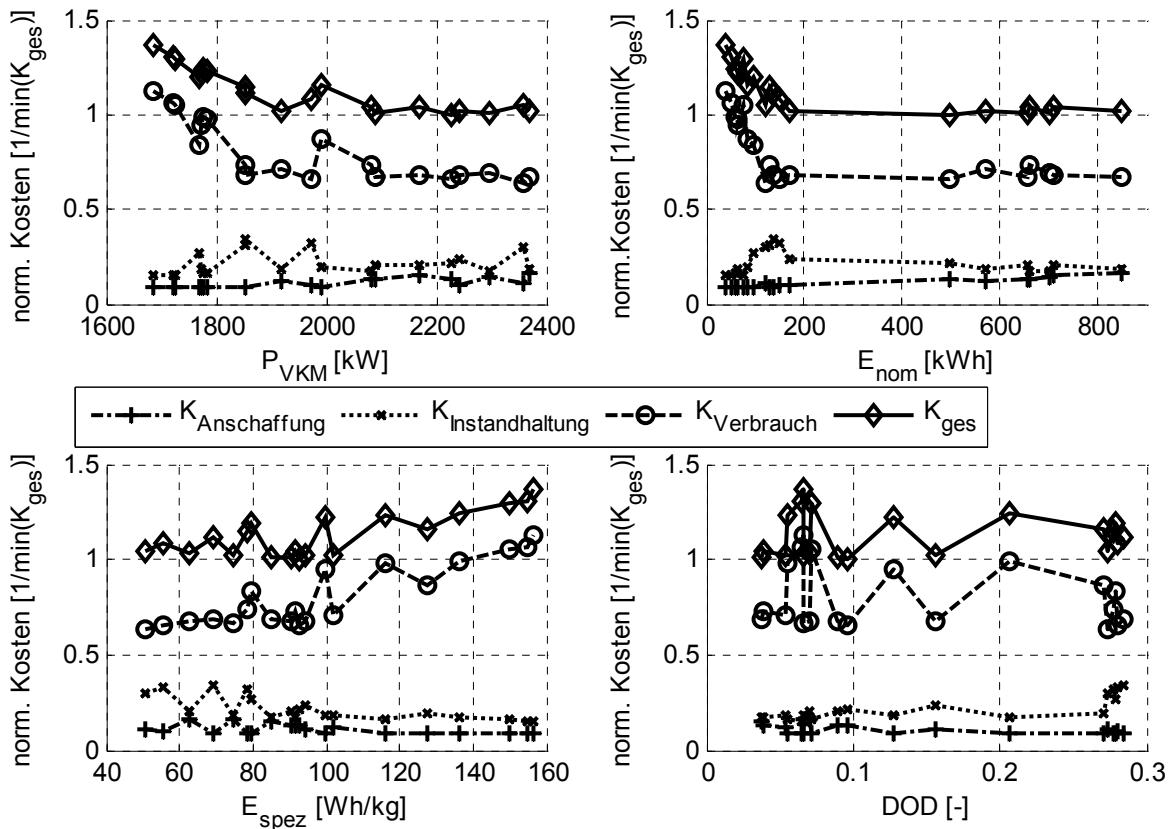


Abbildung 6-12: Verlauf der Einzel- und Gesamtkosten über den Bereich der Entwurfsvariablen

Mit Hilfe der mehrkriteriellen Optimierung und der verschiedenen grafischen Darstellung der Zielfunktionswerte mit ihren zugehörigen Entwurfsvektoren können die Abhängigkeiten zwischen diesen nachvollzogen werden. Durch eine einkriterielle Optimierung im Hinblick auf die speziellen Wünsche des Betreibers ist es weiterhin möglich, die Ergebnisse der Pareto-Fronten mit dem Fokus auf ein spezielles Entwicklungsziel weiter zu verbessern und zu überprüfen.

Auf Basis dieser Erkenntnisse können im Gespräch mit dem Kunden die passenden Konfigurationen ausgewählt werden. Diese können auch durch die Verfügbarkeit bestimmter Komponenten beeinflusst werden.

6.8 Schlussfolgerung

In diesem Kapitel wurde ein Verfahren aufgezeigt, mit dem für eine dieselelektrische Lokomotive mit Energiespeicher eine passende Fahrzeugkonfiguration gefunden werden kann. Der Prozess beginnt mit der Definition eines repräsentativen Betriebsszenarios. Ein vollautomatischer Berechnungsalgorithmus ermittelt problemspezifisch optimale Konfigurationen hinsichtlich unterschiedlicher Gewichtung der Kostenbestandteile der LCC. Dadurch können Aussagen über den Einfluss verschiedener Speicherparameter getroffen werden. Über eine Sensitivitätsanalyse werden Unsicherheiten bezüglich der Eingangsparameter transparent gemacht. Das Optimierungsergebnis bietet die Grundlage für Gespräche mit dem zukünftigen Fahrzeugbetreiber und den Fahrzeugkonstrukteuren, welche somit die Möglichkeiten des Speichereinsatzes bewerten und realisierbare Konfigurationen ableiten können. Der Entwurfsprozess kann dadurch wesentlich vereinfacht werden.

Der Systemansatz ist auf weitere Fahrzeugparameter, wie z. B. der Anzahl der verwendeten Gensets oder die Dimensionierung der Fahrmotoren, erweiterbar. Die genetischen Algorithmen bieten dafür die Möglichkeit der Optimierung für eine größere Anzahl von Parametern. Bisher ist die Fahrzeugoptimierung von der Konfigurationsoptimierung entkoppelt. Dies liegt primär darin begründet, dass die verschiedenen Modellierungsebenen modular aufgebaut sind, um auch separat betrieben und getestet werden zu können. Die Einbeziehung der Parameter der vorgestellten regelbasierten Steuerstrategien für Fahrtverlauf und Speicherbetrieb in den Entwurfsvektor der evolutionären Algorithmen ist möglich. Gegebenenfalls ist dabei ein Geschwindigkeitsvorteil zu erzielen, da die Betriebsstrategien zwar von der Speichergröße abhängen, die Grundzüge des verbrauchs- bzw. speicheralterungsoptimalen Betriebs jedoch erhalten bleiben. Durch einen Verzicht auf die kaskadierte Optimierung kann dieses Wissen in die nachfolgenden Berechnungsgänge transportiert werden. Dagegen spricht, dass eine breitere Streuung von Fahrzeiten auftreten wird und bei längeren Strecken die Anzahl der betrieblichen Parameter reduziert werden muss oder aber diese die für den Entwurf entscheidenden Konfigurationsparameter zahlenmäßig dominieren. Beides kann sich ungünstig auf die Qualität der Optimierung auswirken.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Nutzung von Speichertechnologien ist neben der Abwärmenutzung und der energiesparenden Fahrweise die effizienteste Maßnahme zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs bei Dieselfahrzeugen. Zusätzlich zur Rekuperation von Bremsarbeit können die Funktionen Lastpunktverschiebung und der emissionsfreie Betrieb mit Hilfe eines Energiespeichers realisiert werden. Der Einsatz elektrischer Energiespeicher erweist sich als geeignet für dieselektrische Schienenfahrzeuge im Personenverkehr, da diese durch die bereits vorhandenen elektrischen Antriebskomponenten relativ einfach zu hybridisieren sind und eine nutzungsgerechte Speicherauslegung aufgrund weitgehend bekannter Fahraufgaben möglich ist. Die Möglichkeit der vollständigen Energierekuperation bei Bremsung aus Höchstgeschwindigkeit ist dabei aufgrund der großen Masse und des hohen Energieinhalts eines solchen Speichers oft nicht gegeben und auch wirtschaftlich nicht sinnvoll.

In der Arbeit wird ein durchgängiges Verfahren zur Auslegung von dieselektrischen Lokomotiven mit Energiespeichern im Personenverkehr dargestellt. Im Fokus liegt dabei der Einsatz von Optimierungsalgorithmen zur Verbesserung des Generatorsystems und des elektrischen Energiespeichers im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch und die Lebenszykluskosten. Dafür wurde ein Berechnungsprogramm zur Zugfahrt- und Energieflusssimulation entwickelt und für die Grundkonfiguration validiert. Die gewählte Abbildungstiefe erlaubt Aussagen über die erreichbare Fahrzeit und den fahrzeitabhängigen Kraftstoffverbrauch für spezifische Strecken und Zugkonfigurationen.

Das erstellte Berechnungsprogramm bietet die Basis zur Untersuchung verschiedener Strategien für die Fahrtgestaltung unter Berücksichtigung der Fahrzeitreserven, den Betrieb des Energiespeichers und der Steuerung von Anlagen mit mehreren Dieselmotorgeneratorsätzen. Neben der Nutzung regelbasierter Strategien werden dabei auch vorausschauende Betriebsstrategien eingesetzt, welche die Möglichkeiten der bei Schienenfahrzeugen im Vorfeld bekannten Streckengeschwindigkeiten und -topologie nutzen. Die lebenszykluskostenbasierte Konfigurationsoptimierung wird durch ein Modul realisiert, welches unter Berücksichtigung der Lokkonfiguration und der Energiesimulation für ein vorgegebenes Streckenprofil die Verbrauchs-, Instandhaltungs- und Anschaffungskosten für das Fahrzeug berechnet. Die Kalkulation basiert darauf, dass ein Grundbetrag für die Anschaffungs- und Instandhaltungskosten angesetzt wird und nur die Differenzkosten durch die Konfigurationsänderung des Generatorsatzes und des Energiespeichers berücksichtigt werden.

Bei der Evaluation möglicher Speichertechnologien haben sich Doppelschichtkondensatoren und High-Energy-Li-Ionen-Speicher als geeignet herausgestellt. Diese haben sich bereits in Fahrzeuganwendungen bewährt. Sie weisen jedoch suboptimale Ladezeiten auf, was zu relativ hohen Speichermassen für eine bestimmte angestrebte Kraftstoffeinsparung führt. High-Power-Li-Ionen-Speicher können diese Lücke schließen, sind jedoch noch nicht auf dem Markt verbreitet. Deshalb wurden alle genannten Speichertypen in die Untersuchung einbezogen.

Die energiesparende Fahrweise und der Betrieb von Energiespeichern hängen eng zusammen. Zum einen reduzieren Ausrollphasen die verfügbare Bremsarbeit, da die kinetische Energie zur Überwindung der Fahrwiderstände oder zum Betrieb der Nebenaggregate genutzt werden kann. Zum

anderen kann eine angepasste Fahrweise zur besseren Ausnutzung von Energiespeichern mit geringer spezifischer Leistung beitragen, da die Rekuperationszeiten wesentlich verlängert werden können. Für die Erstellung einer angepassten Fahrstrategie wird die sukzessive Approximation in Kombination mit den Fahrregimen „Ausrollen“, „Rekuperatives Verzögern“ und „Reduktion der Fahrgeschwindigkeit“ verwendet, welche sich gegenüber der vollständigen Prädiktion mit Hilfe der dynamischen Programmierung durch geringere Berechnungszeiten und eine einfache Kopplung an die Optimierung der Speicherstrategien auszeichnet. Bei High-Energy-Li-Ionen-Batterien kann eine speicheroptimale Rekuperation in Ausrollphasen den Kraftstoffverbrauch gegenüber dem klassischen Ausrollen um ca. drei Prozentpunkte reduzieren.

Für den effizienten Speicherbetrieb ist die Verwendung vorrausschauender Strategien zweckmäßig, welche mit Hilfe der dynamischen Programmierung ermittelt werden. Der Algorithmus kann zum einen direkt in die Fahrzeugsteuerung implementiert oder aber zur Minimierung des Rechenaufwands für die Offline-Optimierung regelbasierter Betriebsstrategien genutzt werden. Durch die Optimierung werden der Speicherwirkungsgrad angehoben, die Verluste minimiert und die Möglichkeiten der Lastpunktverschiebung ausgeschöpft. Von großer Bedeutung ist eine solche Funktion vor allem für Downsizingkonzepte, bei denen die Unterstützung der Batterie zur Abdeckung der Leistungsanforderungen benötigt wird und der dafür vorzuhaltende Energievorrat im Speicher prädiert werden kann. Das Verbrauchseinsparpotential beträgt hier bis zu 18 Prozent, da die Rekuperation der Bremsarbeit wesentlich gefördert wird.

Unter dem Gesichtspunkt der Rentabilität eines Speichersystems spielt jedoch nicht nur die erzielte Kraftstoffeinsparung, sondern auch die Speicheralterung eine Rolle. Der zyklusbasierte Speicherverschleiß ist im Wesentlichen durch den auftretenden Ladungsumsatz gekennzeichnet, welcher in die Optimierung der Betriebsstrategien durch äquivalente Kosten einbezogen werden kann.

Mit Hilfe der Energiesimulation und zusätzlicher Ansatzfunktionen für Verbrauchs-, Anschaffungs- und Instandhaltungskosten ist die Betrachtung der Lebenszykluskosten von dieselelektrischen Lokomotiven möglich. Die mehrkriterielle Optimierung erlaubt dabei die Abschätzung des Einflusses von Entwurfsparametern und die Identifikation von günstigen Konfigurationen. Die Eignung der evolutionären Algorithmen für diese Aufgabe konnte nachgewiesen werden. In Kooperation mit den Kunden und den Fachabteilungen wird dem Systemingenieur damit ein funktionsfähiges Werkzeug in die Hand gegeben, um Auslegungsdaten zu gewinnen und eine günstige Lok- und Speicherkonfiguration zusammenzustellen.

Ausblick

Durch die fortschreitende Entwicklung bei der Erforschung und Implementierung von Energiespeichern für Fahrzeuganwendungen werden in Zukunft leistungsfähigere Energiespeicher zur Verfügung stehen. Gleichzeitig werden die Modularität, die Sicherheit und die Zuverlässigkeit der angebotenen Systeme steigen. Dies wird zu einer größeren Anzahl von Speicherfahrzeugen im Bereich der Dieseltriebfahrzeuge führen. Das vorgestellte Simulationswerkzeug bietet sich für die Auslegung der passenden Energiespeicherlösungen an. Die Erfahrungen und Messungen an den

entstehenden Kleinserienfahrzeugen werden eine Rückmeldung in Form der Validierung von Annahmen geben und damit die verbleibenden Unsicherheiten im Auslegungsprozess reduzieren. Diese betreffen beispielsweise die Beschreibung der Speicheralterung, die im Betrieb erreichbare Speicherleistung und die Zusammenhänge zwischen diesen Parametern.

Weiterhin wäre der Einsatz der gezeigten speicher- und verbrauchsoptimalen Fahrstrategien auf Fahrzeugen wünschenswert. Dafür muss die Integration in die Fahrzeugsteuerung durchgeführt und ein detailliertes Steuerkonzept für alle im realen Fahrzeugeinsatz auftretenden Abweichungen (wie z. B. Verspätungen, nicht vorhandene Streckeninformationen, unbekannte Zugkonfiguration) entworfen werden. Dafür kann eine Kopplung mit Programmen zur übergeordneten Simulation des Betriebsablaufs sinnvoll sein. Die effiziente Speichernutzung bleibt dabei ein Schlüssel zur Nutzung der ökologischen und ökonomischen Potentiale der Speichersysteme.

Im Jahr 2013 wird die erste Mehrmaschinenlokomotive für die DB Regio ausgeliefert. Neben der erfolgreichen Integration in das Fahrzeug ist auch hier die Betriebsstrategie von großer Bedeutung für die Sicherstellung der Leistungsfähigkeit des Systems, das Erreichen der spezifizierten Lebensdauer und die bestmögliche Nutzung der Verbrauchspotentiale. Das Mehrmaschinenkonzept stellt auch für andere Einsatzbereiche bzw. Leistungsklassen eine Chance zur Entwicklung verbrauchs-optimierter Lokomotiven dar. Bei der detaillierten Systementwicklung bietet sich der Einsatz von verfeinerten dynamischen Modellen für die Simulation des Gesamtfahrzeugs oder einzelner Komponenten an, um regelungstechnische Aspekte und hochfrequente Vorgänge untersuchen zu können.

Für die Weiterentwicklung des Programms scheint die Kopplung zweier bisher getrennt betrachteter Berechnungsebenen vielversprechend. Die evolutionären Algorithmen können für die kombinierte Optimierung der regelbasierten Fahrtrajektorien und der Konfigurationsoptimierung in einem Entwurfsraum genutzt werden. Damit könnte ein Geschwindigkeitsvorteil erzielt werden, weil die optimale Fahrtrajektorie zwar konfigurationsabhängig ist, gewisse Tendenzen jedoch gleich bleiben.

Die Aufstellung der Zielfunktionen der Lebenszykluskostenberechnung erfolgte anhand von Kennwerten der Referenzlokomotive und Datenblattrecherchen. Die Fahrzeughersteller können auf ihre internen, gegebenenfalls detaillierteren Kostenmodelle zugreifen. Für den jeweiligen Hersteller steigt dadurch die Aussagekraft der Ergebnisse, da herstellerspezifische Gegebenheiten, wie z. B. spezielle Konditionen von Zulieferern, in diesen berücksichtigt sind.

Die Priorität einer realistischen Lebenszykluskostenermittlung mit einer gleichberechtigten Berücksichtigung der Kosten für Kraftstoffe oder elektrische Energie wird weiter steigen. Mit den vielfältigen Möglichkeiten zur Verbrauchsreduktion wird eine nachvollziehbare, schnelle und praxisgerechte Auslegung damit immer wichtiger. Die vorgestellten Optimierungsmethoden bilden einen Beitrag, um die Nachhaltigkeit von dieselelektrischen Schienenfahrzeugen als umweltfreundliches, wirtschaftliches und sicheres Verkehrsmittel weiter zu fördern.

8 Verzeichnisse

8.1 Literatur

- [Alb04] ALBRECHT, T.: *Ein Beitrag zur Nutzbarmachung Genetischer Algorithmen für die optimale Steuerung und Planung eines flexiblen Stadtschnellbahnbetriebes*, TU Dresden, Dissertation, 2004
- [Alb08] ALBRECHT, T.: Energy-efficient Train Operation. In: *Railway Timetable & Traffic*. Hansen, I. A. and Pachl, J., 2008, S. 83–105
- [All11] ALLIANZ PRO SCHIENE: *Todesrisiko im Zug 63-mal geringer als im Auto*. www.allianz-pro-schiene.de/sicherheit/todesrisiko-verkehr.print.html (abgerufen am 06.01.2011), 2011
- [AMWW09] ANGERER, G. ; MARSCHIEDER, F. ; WENDL, M. ; WIETSCHEL, M.: Lithium für Zukunftstechnologien - Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität / Fraunhofer ISI. 2009. – Forschungsbericht
- [AS07] ACIKBAS, S. ; SÖYLEMEZ, M. T.: Coasting Point Optimization for Mass Rail Transit Lines using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms. In: *IET Electric Power Applications* 2 (2007), S. 172–182
- [Asc10] ASCHOFF, S.: *Optimierung der Betriebsstrategie und Konfiguration von Bahnfahrzeugen mit Energiespeicher*, IBB, TU Dresden, Diplomarbeit, 2010
- [Bac05] BACK, M.: *Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen*, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2005
- [Bal06] BALL, R.: *Supercapacitors see growth as costs fall*. <http://www.electronicsweekly.com/Articles/03/03/2006/37810/Supercapacitors-see-growth-as-costs-fall.htm> (abgerufen am 06.01.2012), 2006
- [Bau09] BAUER, S.: World wide battery market analysis and trends of the automotive sector. In: *2. Entwicklerforum Akkutechnologien Aschaffenburg*, 2009
- [Beh08] BEHMANN, U.: Bahnenergiebedarf der Traktionsarten im Vergleich. In: *eb - Elektrische Bahnen* 106 (2008), S. 547–554
- [Bei06] BEITELSCHMIDT, M.: *Gekoppelte Simulation und Echtzeitsimulation*. Skriptum zur Vorlesung an der TU Dresden. 2006
- [Ber07] BERGER, J.: Energieeffizientere und umweltfreundlichere Dieselantriebe der Zukunft. In: *DMG-Fachseminar F10/2007: Antriebstechnik moderner Diesel-Triebfahrzeuge*, 2007
- [Ber08] BERNET, S.: *Grundlagen der Leistungselektronik*. Skriptum zur Vorlesung an der TU Dresden. 2008

- [Ber09] BERTSEKAS, D. P.: *Lecture Slides on Dynamic Programming*. Massachusetts Institute of Technology, 2009
- [BKE01] BASS, J. C. ; KUSHCH, A. S. ; ELSNER, N.: Thermoelectric Generator (TEG) for Heavy Diesel Trucks. In: *XX International Conference on Thermoelectrics*, IEEE, 2001
- [Blo11] BLOCK, K.: *Straßenbahn oben ohne – Münchner Stadler-Tram mit Batterieantrieb schafft Weltrekord*. Pressemitteilung der Fa. Stadler, 2011
- [BNR06] BEUME, N. ; NAUJOKS, B. ; RUDOLPH, G.: Mehrkriterielle Optimierung durch evolutionäre Algorithmen mit S-Metrik-Selektion / Lehrstuhl für Algorithm Engineering, Universität Dortmund. 2006. – Forschungsbericht
- [Bos06] BOSSEL, U.: Wasserstoff löst keine Energieprobleme. In: *Technologiefolgeabschätzung - Theorie und Praxis* 1, 15. Jahrgang (2006), S. 2006
- [Bra10] BRAUN, R.: Mit neuen Entwicklungen aus der Krise. In: *Branchenindex - Automotive Electronics* (2010), S. 6–11
- [Bro10] BROWN, J.: The Introduction of Multi-Engine Locomotives into Australia. In: *AusRAIL* Downer Rail, 2010
- [BSI02] BSI: *Reciprocating Internal Combustion Engines — Performance — Part 1: Declarations of Power, Fuel and Lubricating Oil Consumption, and Test Methods - Additional Requirements for Engines for General Use*. BS ISO 3046-1:2002, 2002
- [BSS05] BENTLEY, P. ; STONE, D. A. ; SCHOFIELD, N.: The Parallel Combination of a VRLA Cell and Supercapacitor for Use as a Hybrid Vehicle Peak Power Buffer. In: *Journal of Power Sources* 147 (2005), S. 288–294
- [BT05] BT: *TRAXX P160 DE for LNVG - Technische Daten*. 2005. – Bombardier Transportation, intern
- [BT10] BT: *Verbrauchskennfelder verschiedener Dieselmotoren zur Projektierung*. 2010. – Bombardier Transportation, intern
- [Bus08] BUSCHBACHER, H.: *Effizienzsteigerung im Eisenbahnverkehr: Geringere Kosten für Verdichtung und Qualitätssteigerung im Regional- und Vorortverkehr Südmährens*, Technische Universität Wien, Dissertation, 2008
- [Cou06] COUSINEAU, R.: Development of a hybrid switcher locomotive. In: *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine* February (2006), S. 25–29
- [CSKB07] CASSEBAUM, O. ; SCHURICHT, P. ; KUTTER, S. ; BÄKER, B.: Herausforderungen hybrider Fahrzeugkonzepte mit vorausschauenden Fahrerassistenzsystemen. In: BÄKER, B. (Hrsg.): *Moderne Elektronik im Kraftfahrzeug II*, Haus der Technik, 2007, S. 146–158
- [DIN04] DIN: *Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten*. DIN EN 60300-3-3:2004, 2004

- [DIN05] DIN: *Bahnanwendungen - Akustik - Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen*. DIN EN ISO 3095:2005-11, 2005
- [Dis10] DISCHER, A.: *Beitrag zur Hybridisierung von Dieseltriebwagen - Hydrostatische Bremsenergie-Rekuperation bei Dieseltriebwagen*, TU Dresden, Dissertation, 2010
- [EG04] EG ; EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (Hrsg.): *Berichtigung der Richtlinie 2004/26/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. April 2004 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte*. Amtsblatt Nr. L 225 vom 25. 06. 2004, S. 3-107. Europäische Gemeinschaft, 2004
- [EG07] EG ; EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (Hrsg.): *Verordnung (EG) Nr. 1371/2007 des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Rechte und Pflichten der Fahrgäste im Eisenbahnverkehr*. Amtsblatt Nr. L 315/14 vom 03. 12. 2007, S. 14-41. Europäische Gemeinschaft, 2007
- [ENO07] ENOTRAC: *Software Tools - Fabel*. ENOTRAC AG, 2007
- [ER06] EFFATI, S. ; ROOPARVAR, H.: The Minimization of the Fuel Costs in the Train Transportation. In: *Applied Mathematics and Computation* 175 (2006), S. 1415–1431
- [ERI11] ERI: Projektskizze für oberleitungsunabhängige E-Traktion - Fahrzeug mit mobilem Energiespeicher / DB Eco Rail Innovation. 2011. – Forschungsbericht
- [EWG70] EWG: *Richtlinie des Rates vom 20. März 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen*. 1970
- [Fei09] FEIHL, J.: *Die Diesellokomotive - Aufbau - Technik - Auslegung*. 2. bearbeitete und ergänzte Auflage. Transpress Verlag, 2009
- [FES10] FES: Performance Verification of a Flywheel Energy Storage System for Heavy Hybrid Vehicles / Flywheel Energy System Inc. 2010. – Forschungsbericht
- [Fli06] FLIEGE, L. ; STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND (Hrsg.): *Pressemitteilung Nr. 403: 38000 Kilometer Eisenbahnnetz in Deutschland*. Statistisches Bundesamt Deutschland, 2006
- [Fly10] FLYBRID SYSTEMS: *Flywheel Capacitor*. <http://www.flywheelcapacitor.com/> (abgerufen am 06.01.2012), 2010
- [FMT02] FRANKE, R. ; MEYER, M. ; TERWIESCH, P.: Optimal Control of the Driving of Trains. In: *at - Automatisierungstechnik* 12/2002 (2002), S. 606–613
- [Fou09] FOUDA, S.: Optimierte Energieversorgung kompletter Transportsysteme per Computersimulation. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 01+02 (2009), S. 32–35

- [FR88] FEIHL, J. ; ROSE, H.: Untersuchung zur Energieeinsparung bei der Dieseltraktion. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden* 35 (1988), S. 879–887
- [GA99] GUZZELLA, L. ; AMSTUTZ, A.: CAE Tools for Quasi-Static Modeling and Optimization of Hybrid Powertrains. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 48 (1999), S. 1762– 1769
- [Gai04] GAINES, L.: Locomotive Idling. In: *National Idling Reduction Planning Conference*, 2004
- [Gar02] GARCIA, O.: *DC/DC-Wandler für die Leistungsverteilung in einem Elektrofahrzeug mit Brennstoffzellen und Superkondensatoren*, ETH Zürich, Dissertation, 2002
- [Gaw92] GAWTHORPE, R. G.: Aerodynamik im Eisenbahnbereich - Bestimmung des Laufwiderstands eines schnellen Reisezugs auf typischer, offener Strecke mit von der DB angewandten Methoden / ERRI. 1992. – Forschungsbericht
- [GBKS07] GROTENDORST, J. ; BIRKE, P. ; KELLER, M. ; SCHIEMANN, M.: Lithium-Ionen Batteriesysteme für Hybrid- und Elektrofahrzeuge / Continental AG. 2007. – Forschungsbericht
- [Geo09] GEORGI, R.: Valence Flexible Lithium Phosphate Energy Storage Solutions. In: 2. *Entwicklerforum Akkutechnologien Aschaffenburg*, 2009
- [Ger10] GERADTS, K.: *Abschätzung der Daten für eine Differenzkostenanalyse auf Basis der Lokomotive TRAXX DE 160 P.* 2010. – Emails vom 16. Juli 2010, 22. Juli 2010 und 29. Oktober 2010
- [GF07] GROTE, K.H. ; FELDHUSEN, J.: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau (22. Auflage)*. Springer, 2007
- [Gil11] GILLE, A.: Grüne Mobilität: Energiesparen auf Schienen - IT-System DYNAMIS für Eisenbahnen im Personen- und Güterverkehr / Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb. 2011. – Forschungsbericht
- [GS07] GUZZELLA, L. ; SCIARRETTA, A.: *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*. Bd. Second Edition. Springer, 2007
- [Gut04] GUTTENBERG, P.: *Der Autarke Hybrid am Prüfstand – Funktion, Kraftstoffverbrauch und energetische Analyse*, Technische Universität München, Dissertation, 2004
- [Hec09] HECKENBERGER, T.: Kühlung von Li-Ionen-Batterien – mehr als nur eine weitere Kühlungsaufgabe. In: *Thermomanagement bei Hybridfahrzeugen*, 2009
- [Heg11] HEGHMANN, A.: *Konzipierung einer Start/Stopp-fähigen Starteinrichtung für einen Dieselmotor unter Nutzung innovativer Energiespeicher*, IBB, TU Dresden, Diplomarbeit, 2011
- [Hei11] HEISENBERG, W.: *Physik und Philosophie*. 8. Auflage. S. Hirzel Verlag, 2011

- [HKR02] HOFFMANN, G. ; KONCHA, A. ; RÖHLING, S.: *ELBAS-Sinanet: Simulationsprogramm für Gleichstrom-Bahnen im Nah- und Fernverkehr.* ELBAS, 2002
- [HKR03] HOFFMANN, G. ; KONCHA, A. ; RÖHLING, S.: *ELBAS-Webanet: Simulationsprogramm für Wechselstrom-Bahnen im Nah- und Fernverkehr.* ELBAS, 2003
- [Hop04] HOPMANN, U.: Diesel Engine Waste Heat Recovery Utilizing Electric Turbocompound Technology. In: *DEER Conference*, 2004
- [HS09] HACKMANN, M. ; SCHOLZ, M.: UN-Tests von Großbatterien. In: *2. Entwicklerforum Akkutechnologien Aschaffenburg*, 2009
- [HSBG12a] HEGHMANNS, A. ; SCHIMKE, R. ; BEITELSCHMIDT, M. ; GERADTS, K.: Thermoelectric generator system for waste heat usage in diesel electric vehicles. In: *2nd International Energy Efficient Vehicles Conference, 18. und 19. Juni, 2012.* – Vortrag angenommen
- [HSBG12b] HEGHMANNS, A. ; SCHIMKE, R. ; BEITELSCHMIDT, M. ; GERADTS, K.: *Untersuchung der Betriebsstrategie für eine DE-Lok mit Mehrmotorenleistungserzeugung.* Vortragsangebot zur 12. Internationalen Schienenfahrzeugtagung Dresden, 2012
- [HT05] HEINZE, H. E. ; TSCHÖKE, H.: Definition und Einteilung von Hubkolbenmotoren. In: BASSHUYSSEN, R. van (Hrsg.) ; SCHÄFER, F. (Hrsg.): *Handbuch Verbrennungsmotoren - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven* Bd. 3. Vieweg Verlag, 2005, Kapitel 2, S. 9–14
- [HTC04] HU, Y. ; TATLER, J. ; CHEN, Z.: A Bidirectional DC/DC Power Electronic Converter for an Energy Storage Device in an Autonomous Power System. In: *Power Electronics and Motion Control Conference*, 2004, S. 171–176
- [Inn10] INNOZ AND SCI: Eco Rail Innovation – Herausforderungen für das System Bahn 2020 / Innovationszentrum für Mobilität und gesellschaftlichen Wandel GmbH, SCI Verkehr GmbH. 2010. – Forschungsbericht
- [Jan08] JANTZEN, M.: Alles eine Frage des Speichers. In: *Photon September* (2008), S. 68–69
- [JKP⁺⁹⁹] JAKOB, W. ; KNORR, B. ; PARODAT, S. ; PETERS, D. ; UHLIG, A.: Optimierung von Mikrosystemen. In: *8. GMM-WS: Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen*, 1999, S. 241–254
- [Jos07] JOSSEN, A.: Redox-Flow Batterien - Ein System zur Langzeitspeicherung. In: *Elektrische Energiespeicher - Netzoptimierung bei regenerativer Stromerzeugung*, 2007
- [Jos09] JOSSEN, A.: Prüfmethoden und geeignete Testsysteme - Widerstandsmessung an Batterien. In: *2. Entwicklerforum Akkutechnologien Aschaffenburg*, 2009
- [JW06] JOSSEN, A. ; WEYDANZ, W.: *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen.* Reichardt Verlag, 2006

- [JZS⁺10] JÄNSCH, D. ; ZHOU, W. ; SCHIMKE, R. ; BEITELSCHMIDT, M. ; KITTE, J. ; POHLE, M.: Thermoelectrics goes E-Mobility - Wärmemanagement der Lithium-Ionen-Batterie. In: *Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs VII*, 2010
- [Kar05] KARLSSON, A.: *Evaluation of Simulink/SimPowerSystems and other Commercial Simulation Tools for the Simulation of Machine System Transients*, KTH Stockholm, Masterarbeit, 2005
- [KB03] KNÖRR, W. ; BORKEN, J.: Erarbeitung von Basisemissionsdaten des dieselbetriebenen Schienenverkehrs unter Einbeziehung möglicher Schadstoffminderungstechnologien / ifeu - Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH. 2003. – Forschungsbericht
- [KB11] KUTTER, S. ; BÄKER, B.: Optimale Betriebsführung von Hybridfahrzeugen durch prädiktive Bestimmung des Energieäquivalents. In: *Mechatroniktagung Dresden*, 2011, S. 145–150
- [KBA10] KBA: Weniger Motorleistung bei Neuwagen / Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes. 2010. – Forschungsbericht
- [Kha07] KHAMMAS, A. A. W.: *Buch der Synergie*. www.buch-der-synergie.de (abgerufen am 06.01.2012), 2007
- [Khm00] KHMELNITSKY, E.: On an Optimal Control Problem of Train Operation. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 45 (2000), Nr. 7, S. 1257–1266
- [Kie09] KIEMER, K.: Bekanntmachung - Lieferauftrag 356834-2009 - Herstellung, Zulassung und Lieferung von Streckendiesellokomotiven. In: *EU Amtsblatt S* 248 (2009)
- [KKJ⁺05] KOOT, M. ; KESSELS, J. T. B. A. ; JAGER, B. de ; H., Heemels W. P. M. ; BOSCH, P. P. J. d. ; STEINBUCH, M.: Energy Management Strategies for Vehicular Electric Power Systems. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 54 (2005), Nr. 3, S. 771–782
- [KL08] KLAUSNER, S. ; LEHNERT, M.: Betriebsspezifische Auslegung von Energiespeichern für Straßenbahnen. In: *eb - Elektrische Bahnen* 5 (2008), S. 237–246
- [KM06] KRUISWYK, R. W. ; MILAM, D. M.: Engine System Approach to Exhaust Energy Recovery. In: *DEER Conference*, 2006
- [Kri09] KRIMMLING, J.: Energieoptimierte Fahrweisen im schienengebundenen (Nah)Verkehr. In: *5. ViMOS-Tagung*, 2009
- [KSH⁺07] KUMAR, A. K. ; SHAFFER, R. G. ; HOUPP, P. K. ; MOVSICHOFF, B. A. ; CHAN, D. S. K. ; EKER, S. A.: *Trip Optimization System and Method for a Train*. 2007
- [KSL09] KACHE, M. ; STEGLICH, U. ; LÖFFLER, G.: Steigerung der Energieeffizienz von dieselhydraulischen Triebwagen für den Nah- und Regionalverkehr. In: *10. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden*, 2009, S. 115–117
- [Köt02] KÖTZ, R.: Doppelschichtkondensatoren – Technik, Kosten, Perspektiven. In: *Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik*, 2002

- [Kuh07] KUHN, T.: Entwicklungstrends von Dieselmotoren zur Darstellung niedriger Emissionen. In: *DMG-Fachseminar F10/2007: Antriebstechnik moderner Diesel-Triebfahrzeuge*, 2007
- [KWH06] KALETTA, P. ; WOLF, K. ; HACHENBERG, D.: Optimisation of Composite Aircraft Panels Using Efficiency enhancing Evolutionary Algorithms. In: *25th International Congress of Aeronautical Sciences*, 2006
- [Lan11] LANGE, B.: Die neue Multi-Engine-Lokomotive für den Regional- und Güterverkehr der DB AG. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 9 (2011), S. 24–27
- [LBJ⁺10] LEDER, H.-W. ; BAUR, K. G. ; JUST, P. ; KÖCK, F. ; BREINL, W. ; LEDER, H.-W. (Hrsg.): *TRAXX-Lokomotiven - Unterwegs auf Europas Schienen*. Eisenbahn Kurier, 2010
- [LE03] LUKIC, S. M. ; EMADO, A.: Modeling of electric machines for automotive applications using efficiency maps. In: *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference*, 2003
- [Leh07] LEHMANN, H.: Energiesparende Fahrweise bei der Deutschen Bahn. In: *eb - Elektrische Bahnen* 105 (2007), S. 397–402
- [Lem01] LEMKE, J.: Betriebskostenberechnung für Kabinensysteme / Forschung und Entwicklung, Daimler Chrysler AG. 2001. – Forschungsbericht
- [LG05] LINDMAYER, M. ; GRUNDMANN, J.: Hochtemperatur-Supraleiter in Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik – Stand der Forschung. In: *ETG-Tagung: Technische Innovationen in Verteilungsnetzen*, 2005
- [Lin04] LINDER, U.: *Optimierung von Fahrweisen im spurgeführten Verkehr und deren Umsetzung*, TU Berlin, Dissertation, 2004
- [LNG⁺08] LACHE, R. ; NOLAN, P. ; GALVES, D. ; TOULEMONDE, G. ; GEHRKE, J. ; SANGER, K. ; HA, V. ; RAO, S.: Electric Cars: Plugged In / Deutsche Bank. 2008. – Forschungsbericht
- [LPRH09] LEUCHTER, J. ; P., Bauer ; RERUCHA, V. ; HÁJEK, V.: Dynamic Behavior Modeling and Verification of Advanced Electrical-Generator Set Concept. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56 (2009), Januar, Nr. 1, S. 266–279
- [LS08] LINDGREN, D. ; SCHOLTEN, J.: *TEP - Train Energy Performance - Program Specification*. 2008. – Bombardier Transportation, interner Bericht
- [LSWB11] LEHMANN, I. ; SCHMALZING, C.-O. ; WERNER, C. ; BOLD, U.: Hybrid-Powerpack für nachhaltigen und umweltfreundlichen Triebwagenantrieb. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 9 (2011), S. 18–23
- [Luk01] LUKASZEWICZ, P.: *Energy Consumption and Running Time for Trains*, KTH Stockholm, Dissertation, 2001

- [MAN08] MAN: Thermo Efficiency System (TES) for Reduction of Fuel Consumption and CO₂ Emission / MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark. 2008. – Forschungsbericht
- [Mar08] MARSHALL, O.: *Factsheet HRB*. Bosch Rexroth AG, 2008
- [MAT11a] MATLAB: *Global Optimization Toolbox: User's Guide R2011b*. MathWorks, 2011
- [MAT11b] MATLAB: *ode23, ode45, ode113, ode15s, ode23s, ode23t, ode23tb*. MathWorks, 2011
- [Max08a] MAXWELL: *HTM Power Series 125V: BOOSTCAP Ultracapacitor Modules*. Maxwell Technologies, 2008
- [Max08b] MAXWELL: *Ultracapacitor Product Guide*. Maxwell Technologies, 2008
- [Mei08] MEINERT, M.: Einsatz neuer Energiespeicher auf Straßenbahnen. In: *ZEV rail* 132 (2008), S. 72–80
- [Met09] METHNER, S.: Mehrkriterielle Optimierung elektrischer Bahnsysteme. In: *22. Verkehrswissenschaftliche Tage*, 2009
- [Mey32] MEYER, E.: *Die Eisenverluste in elektrischen Maschinen*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 1932
- [MFS03] MARL, R. ; FRIESS, D. ; SCHIEBER, C.: Der EuroRunner® – eine umweltfreundliche Lokomotive von Siemens. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 1/2 (2003), S. 48–53
- [MH08] MEYER, J.-M. ; HUGGENBERGER, T.: 3-Punkt NPC Stromrichterkonzept für hohe Energieeffizienz und Netzmotorfreundlichkeit. In: *Symposium Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstungen*, 2008
- [MLMH08] MEYER, M. ; LERJEN, M. ; MENTH, S. ; HALDER, M.: Das Energiesparprogramm der SBB. In: *ERI - Eisenbahn-Revue International* 07/2008 (2008), S. 338–343
- [MOS10] MAREK, H. ; ORELLANO, A. ; SCHOBER, M.: Energieeffiziente Schienenfahrzeuge und Standardisierung. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 10 (2010), S. 710–717
- [Mul09] MULDER, S.: *Energy Management Strategy for a Hybrid Container Crane*, TU Delft, Masterarbeit, 2009
- [MW01] MARKEL, T. ; WIPKE, K.: Modeling grid-connected hybrid electric vehicles using ADVISOR. In: *Sixteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances*, 2001, S. 23–29
- [Neu08] NEUDORFER, H.: Entwicklung eines flüssigkeitsgekühlten Traktions-Synchrongenerators in Permanentmagnet-Technologie. In: *ZEV rail* 132 (2008), S. 30–38
- [Ngu11] NGUYEN, N. V.: *Integrationsstudie und Auslegung eines Energiespeichers*, IBB, TU Dresden, Masterarbeit, 2011

- [Noc03] NOCKE, J.: *Simulation des motorischen Innenprozesses*. Skriptum zur Vorlesung an der Universität Rostock. 2003
- [Obs08] OBST, M.: *Matlab und Alternativen in der Systemtheorie*, Technische Universität Chemnitz, Studienarbeit, 2008
- [OD09] OOSTRA, J. ; DUNGER, W.: Hybrid-Rangierlokomotive: Technik und Anwendungen. In: *ZEV rail* 133 (2009), S. 365–360
- [Oer09] OERTZEN, J.: *Einsatz von Optimierungsverfahren bei der Modendichtereduktion eines Finite-Elemente-Strukturmodells*, IBB, TU Dresden, Belegarbeit, 2009
- [Ott09] OTTER, M.: Objektorientierte Modellierung und Simulation von Antriebssystemen. In: *Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen*, 2009, S. 1049–1165
- [Pac04] PACHEL, J.: *Systemtechnik des Schienenverkehrs: Bahnbetrieb planen, steuern und sichern*. B.G. Teubner Verlag, 2004
- [Pae83] PAETZOLD, W.: Die gesamtwirtschaftliche Überlegenheit von 500-kW-Industrielokomotiven mit Turbowendegetrieben Bauart Voith. In: *eb - Elektrische Bahnen* 3 (1983), S. 89–94
- [Pap10] PAPROSCH, D.: *Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Energieeinsparungen bei Einsatz des MITRAC Energy Saver*, IBB, TU Dresden, Diplomarbeit, 2010
- [PMSD08] POHLER, J. ; MAZZONE, A. ; SONNLEITNER, W. ; DEGENHARDT, A.: Neue dieselelektrische Streckenlok der Bombardier TRAXX-Familie. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 12 (2008), S. 812–816
- [Poh00] POHLHEIM, H.: *Evolutionäre Algorithmen - Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis*. Bd. 4. Auflage. Springer Verlag, 2000
- [Pre09] PRENELOUP, P.: Battery Technologies in Traction Applications. In: *Railenergy Workshop Energy Efficient Components Berlin*, 2009
- [PRP09] POLENOV, D. ; REITER, T. ; PRÖBSTLE, H.: Optimierung der Fahrzeugenergieversorgung durch Adaptive Bordnetzunterstützung. In: BÄKER, B. (Hrsg.): *Moderne Elektronik im Kraftfahrzeug IV*, Expert Verlag, 2009, S. 39–48
- [RB96] ROHDE-BRANDENBURGER, K.: Verfahren zur einfachen und sicheren Abschätzung von Kraftstoffverbrauchspotentialen. In: *Einfluss von Gesamtfahrzeug-Parametern auf Fahrverhalten/Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch*. Haus der Technik, Essen, 1996
- [Reu07] REUTER, F.: *Fahrzeitkalkulation - Berechnung von Fahrzeit und Kraftstoffverbrauch*. 2007. – Bombardier Transportation, interner Bericht
- [RGB99] RIZZONI, G. ; GUZZELLA, L. ; BAUMANN, M.: Unified Modeling of Hybrid Electric Vehicle Drivetrains. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 4 (1999), S. 246–257

- [RIWK11] RIEGGER, P. ; I., Lehmann ; WERNER, C. ; KOHL, T.: Alternative Antriebskonzepte für Diesel-Triebwagen unter Verwendung eines Hybrid-PowerPacks und Nachweis der technischen Alltagstauglichkeit. In: *11. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden*, 2011
- [Ros06] ROSSETA: Energiespeicher für das Straßenbahnenetz / Rosseta Technik GmbH. 2006. – Forschungsbericht
- [Ros09] ROSENKRANZ, C.: Mobile Speicher elektrischer Antriebsenergie –Lebensdauer und Belastung von Batterien. In: *Dritte Niedersächsische Energietage „Energie und Mobilität“*, 2009
- [RS11] ROSCHER, A. R. ; SAUER, D. U.: Dynamic electric behavior and open-circuit-voltage modeling of LiFePO₄-based lithium ion secondary batteries. In: *Journal of Power Sources* 196 (2011), S. 331–336
- [Saf05a] SAFT: *High power lithium-ion cells - VLP cells*. Saft Batteries, 2005
- [Saf05b] SAFT: *Medium power lithium-ion cells - VL M cells*. http://www.saftbatteries.com/doc/Documents/liion/Cube572/54042_VLM_cells_0305.d0d8d859-9174-42f2-84b2-19632e4b0760.pdf (abgerufen am 06.01.2011), 2005
- [Saf05c] SAFT: *NHP - High power Nickel-metal hydride Module*. Saft Batteries, 2005
- [Saf06] SAFT: Saft's high power Battery Systems for Hybrid Tramways / Saft Batteries. 2006. – Forschungsbericht
- [Saf08] SAFT: *Li-ion energy storage systems for large space and defense applications*. Saft Batteries, 2008
- [Sau09] SAUER, D. U.: Elektrische Energiespeicher in Hybrid und Elektrofahrzeugen. In: *Seminar für Kraftfahrzeug- und Motorenmechanik*, 2009
- [SB10] SCHIMKE, R. ; BEITELSCHMIDT, M.: *Vorhabensbeschreibung für ein Teilprojekt innerhalb des Verbundprojekts HiTEG*. 2010. – IBB, TU Dresden, unveröffentlicht
- [SBG04] SCIARRETTA, A. ; BACK, M. ; GUZZELLA, L.: Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 12 (2004), Nr. 3, S. 352–363
- [SBT+10] SCHIMKE, R. ; BEITELSCHMIDT, M. ; TEMPELHAHN, C. ; MÜLLER, J. ; REISS, J.: Effiziente Energerekuperation in dieselelektrischen Hafenmobilkränen. In: *10. Internationale Kranfachtagung Bochum*, 2010, S. 167–179
- [SBT+11] SCHIMKE, R. ; BEITELSCHMIDT, M. ; TEMPELHAHN, C. ; MÜLLER, J. ; REISS, J.: Entwicklung von Betriebsstrategien für den effizienten Einsatz von Doppelschichtkondensatoren bei Hafenmobilkränen - Umsetzung und Praxiserfahrungen. In: *Mechatroniktagung Dresden*, 2011, S. 139–144

- [Sch95] SCHOLZ, D.: Betriebskostenschätzung von Flugzeugsystemen als Beitrag zur Entwurfsoptimierung. In: *Jahrbuch zum Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress*, 1995, S. 50 – 61
- [Sch07] SCHEIER, B.: *Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Eisenbahnsystemen anhand von Streckensimulationen am Beispiel einer Nebenstrecke*, FH Braunschweig/Wolfenbüttel, Diplomarbeit, 2007
- [Sch08a] SCHIMKE, R.: *Bewertung der Kraftstoffersparnis bei Mikrohybridsystemen anhand der Start/Stopp-Funktion*, IAD, TU Dresden, Diplomarbeit, 2008
- [Sch08b] SCHUH, H.: Moderne Antriebsbatteriesysteme für Schienenverkehrs-Hybridfahrzeuge. In: *09. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden*, 2008
- [Sch09] SCHÄTZER, C.: *Daten zur TRAXX DE Lokomotive*. 2009. – Email vom 31. Juli 2009
- [Sch10] SCHIMKE, R.: *TEP Validation for Dieselelectric Locomotives*. 2010. – IBB, TU Dresden, interner Bericht
- [Sch11a] SCHIMKE, R.: *Bewertung des elektrischen Leerlaufs hinsichtlich des Einflusses auf den Kraftstoffverbrauch*. 2011. – IBB, TU Dresden, interner Bericht
- [Sch11b] SCHMIDT, Torsten: Hochspannend: Hybrid- und Elektrofahrzeuge. In: *Kraftband 22* (2011), S. 10–15
- [Sch11c] SCHREIBER, U.: *SimulationX Fundamentals - An Introduction into System Simulation*. ITI GmbH, 2011
- [Sch11d] SCHÄTZER, C.: Anforderungen an die Zugsammelschiene von Lokomotiven. In: *ETG Workshop - Bordnetzmanagement in Bahnenfahrzeugen*, 2011
- [Söf05] SÖFFKER, C.: *Konzeption und Erprobung eines Schwungradspeichers in einem dieselelektrischen Triebzug*, TU Clausthal, Dissertation, 2005
- [SF09] SPIESS, P. ; FIERMANN, C.: Management Systeme für Multizellen-Batterien. In: *2. Entwicklerforum Akkutechnologien*, 2009
- [SHB11] SCHIMKE, R. ; HEGHMANN, A. ; BEITELSCHMIDT, M.: Verbrauchs- und betriebsoptimale Steuerung von Mehrmotorenlokomotiven mit Motor-Start/Stopp-Funktion. In: *11. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden*, 2011, S. 55–57
- [Sie10] SIEMENS: *Systemauslegung mit Sitras Sidytrac*. Siemens AG, Industry Sector, Mobility Division, 2010
- [SK00] SCHMITT, A. ; KUHLMANN, R.: Simulationsmodell eines elektronisch geregelten 6-Zylinder-Dieselmotors. In: *Dresdner Tagung - Simulation im Maschinenbau - Softwaretools und Anwendungen in Lehre, Forschung und Praxis*, 2000

- [SKP07] STEINER, M. ; KLOHR, M. ; PAGIELA, S.: Energy Storage System with Ultracaps on Board of Railway Vehicles. In: *European Conference on Power Electronics and Applications*, 2007, S. 1–10
- [SOR09] SERRAO, L. ; ONORI, S. ; RIZZONI, G.: ECMS as a realization of Pontryagin's minimum principle for HEV control. In: *American Control Conference*, 2009
- [Spe90] SPERBER, R.: *Technisches Handbuch Dieselmotoren*. VEB Verlag Technik, 1990
- [Ste10a] STEINHÄUSER, C.: *Energetische Modellierung des elektrischen Antriebsstrangs einer DE-Lokomotive*, IBB, TU Dresden, Studienarbeit, 2010
- [Ste10b] STEPHAN, A.: OpenPowerNet – Co-Simulation Tool for Traction Power Supply. In: *IET Conference on Railway Traction Systems*, 2010
- [Sti10] STIER, J.: *Akustische Strukturoptimierung eines Schienenfahrzeuggradsatzes mit einem evolutionären Algorithmus*, IBB, TU Dresden, Diplomarbeit, 2010
- [SW10a] SCHIMKE, R. ; WITTWER, T.: *Intelligente Steuerung der Leistungsaufnahme von Doppelstockwagen*. 2010. – IBB, TU Dresden, interner Bericht
- [SW10b] SCHIMKE, R. ; WITTWER, T.: *Nutzung der rekuperativen elektrischen Bremsung für die Versorgung der Nebenaggregate (Bremskompressor)*. 2010. – IBB, TU Dresden, interner Bericht
- [SZB11] SCHIMKE, R. ; ZIMMERMANN, G. ; BEITELSCHMIDT, M.: Life cycle cost calculations of diesel-electric locomotives with electrochemical storage systems. In: BÄKER, B. (Hrsg.) ; MORAWIETZ, L. (Hrsg.): *Energy Efficient Vehicles Technology I*, Expert Verlag, 2011, S. 57–67
- [Tei83] TEICH, W.: Wesentliche Systemunterschiede zwischen der Drehstromantriebstechnik und der hydraulischen Übertragung. In: *eb - Elektrische Bahnen* 4 (1983), S. 124–131
- [TST08] TOKUYAMA, K. ; SHIMADA, M. ; TERASAWA, K.: Practical Application of a Hybrid Drive System for Reducing Environmental Load / Hitachi. 2008. – Forschungsbericht
- [TTO04] TAKETO, F. ; T., Nobutsugu ; O., Mitsuyuki: Development of an NE Train. In: *JR East Technical Review* 4 (2004), S. 62–70
- [UW03] UNGER-WEBER, F.: *Ecotranz - Train Performance Calculation Program for Electric and Diesel Railroad Vehicles*. 2003. – Bombardier Transportation, interner Bericht
- [VEM06] VEM: *Synchrongenerator Typ DREBZ 4514-6: Datenblatt*. VEM Sachsenwerk, 2006
- [Vit07] VITINS, J.: *Optimized Energy Management*. 2007. – interner Bericht Bombardier Transportation
- [Vit09] VITINS, J.: Die Zweikraft Lokomotive ALP-45DP - Innovationen für den amerikanischen Markt. In: *22. Verkehrswissenschaftliche Tage Dresden*, 2009

- [Vit11] VITINS, J.: Erhöhung der Effizienz und Verringerung der Umweltbelastung mit neuen Lokomotivkonzepten. In: *DMG-Fachsymposium: Lokomotiven und Grüne Technologien*, 2011
- [Vog09] VOGLER, C.: Markteinführung von LifePower Lithium-Eisen-Phosphat. In: *2. Entwicklerforum Akkutechnologien Aschaffenburg*, 2009
- [Wai04] WAIDHAS, M.: Grundlegende Technologie von Doppelschichtkondensatoren. In: *ZVEI Workshop Supercaps*, 2004
- [Wei07] WEICKER, K.: *Evolutionäre Algorithmen*. B.G. Teubner Verlag, 2007
- [Wen03] WENDE, D.: *Fahrdynamik des Schienenverkehrs*. B.G. Teubner Verlag, 2003
- [Wit11] WITTWER, T.: *Validierung optimierter Fahrstrategien aus der Simulation anhand realer Messfahrten*, IBB, TU Dresden, Diplomarbeit, 2011
- [Wäl00] WÄLTERMANN, P.: *Der serielle Hybridantrieb: vom rechnergestützten Entwurf zur Hardware-in-the-Loop-Realisierung*, Universität Paderborn, Dissertation, 2000
- [WLSK10] WINTER, J. ; LINDEMANN, M. ; SCHLEGEL, S. ; KLOOS, H.: Driver Assistance System. In: *RTR - Railway Technical Review 2* (2010), S. 35–40
- [Wol02] WOLBERG, J.: Life Cycle Costs in der Bahnumatisierung / Transportation Systems, Siemens AG. 2002. – Forschungsbericht
- [Wur11] WURTZ, J.: *The N-ViroMotive - The Green, Fuel Efficient Locomotive for Passenger, Mainline Freight and Yard Operations*. National Railway Equipment, 2011
- [Zho09] ZHOU, W.: *Auswahl und Auslegung eines Verlustwärmereückgewinnungssystems für eine dieselelektrische Lokomotive*, IBB, TU Dresden, Großer Beleg, 2009
- [Zho10] ZHOU, Z.: *Untersuchung der Umsetzbarkeit und der Kraftstoffeinsparpotentiale des Einsatzes von Motor-Start/Stopp-Systemen bei dieselelektrischen Schienenfahrzeugen*, IBB, TU Dresden, Großer Beleg, 2010
- [Zim09] ZIMMERMANN, G.: *Modellierung und Vergleich elektrischer Energiespeicher für den Einsatz in Traktionsanwendungen*, IBB, TU Dresden, Studienarbeit, 2009
- [Zim11] ZIMMERMANN, G.: *Mehrkriterielle Konfigurationsoptimierung dieselelektrischer Lokomotiven mit Hilfe evolutionärer Algorithmen*, IBB, TU Dresden, Diplomarbeit, 2011
- [ZS09] ZECHEL, G. ; SCHIMKE, R.: *Vorstudie für die Umrüstung eines Stadtbusses auf einen rein elektrischen Antrieb*. 2009. – IBB, TU Dresden, interner Bericht
- [Zsc10] ZSCHECH, D.: Cerio Technology für Elektro- und Hybridfahrzeuge. In: *Drive-E Akademie*, 2010

8.2 Abbildungen

Abbildung 1-1:	Schema Optimierungsstrategie	7
Abbildung 2-1:	Energiefluss einer dieselelektrischen Lokomotive (Drehstromantriebstechnik)	12
Abbildung 2-2:	Vergleich verschiedener Fahrprofile von Hamburg nach Cuxhaven	16
Abbildung 2-3:	Energieflussdiagramm der dieselelektrischen Lokomotive (Aufteilung Dieselmotorverluste angelehnt an [Spe90], S. 45)	17
Abbildung 2-4:	Übersicht über Energiespeichertechnologien.....	23
Abbildung 2-5:	Aufbau eines Doppelschichtkondensators (nach [Köt02]).....	25
Abbildung 2-6:	Relative Kapazität in Abhängigkeit von der Zyklenzahl [Max08b] (Randbedingungen: Typ Maxwell BCAP 2600 bei maximalem Dauerstrom, Umgebungstemperatur 25 °C)	27
Abbildung 2-7:	Ragone-Diagramm mit eingezeichneten Isolinien der Entladezeit (spezifische Energie unter Berücksichtigung einer eingeschränkten Nutzung des Speicherinhalts, DOD für Batterien: 10 %, DOD für DSK: 75 %, [Datenblätter verschiedener Hersteller, Dezember 2010])	32
Abbildung 2-8:	Spezifischer Energieumsatz von Kombinationen aus zwei Energiespeichern	35
Abbildung 2-9:	Integration von Energiespeichern auf der Lokomotive (schematisch)	36
Abbildung 2-10:	Bidirektionaler DC/DC-Wandler.....	38
Abbildung 2-11:	Alternative Speicheranbindung mit galvanischer Trennung über Transformator	
	38	
Abbildung 3-1:	Zugkraftkennfeld bei variierender Hilfsmaschinenleistung.....	42
Abbildung 3-2:	Streckenprofil mit realen Streckendaten (Stade-Cuxhaven) und eingezeichnetem Fahrtverlauf der schnellsten Fahrt	43
Abbildung 3-3:	Darstellung des Verbrauchsanstieg über der Leistung für vier ausgewählte Dieselmotoren unterschiedlicher Leistung ($P \sim n^3$ -Lastkurven, [BT10])	45
Abbildung 3-4:	Dieselmotorlastprofil auf der Strecke Hamburg – Cuxhaven (bezogen auf Kurbelwelle).....	47
Abbildung 3-5:	Schema Rückwärtssimulation.....	48
Abbildung 3-6:	Schema Vorwärtssimulation.....	50
Abbildung 3-7:	Arbeitsschritte für die Lösung von technischen Problemen mit Hilfe der Simulation (nach [Bei06]).....	51
Abbildung 3-8:	Darstellung der Simulationsumgebung.....	55

Abbildung 3-9:	Momentenbilanz am Genset	56
Abbildung 3-10:	Drehmomentkennfeld des MTU 4000 R43 Stage 3a mit eingezeichneten Isolinien des spezifischen Kraftstoffverbrauchs in g/kWh (nach [Sch11d]) ...	57
Abbildung 3-11:	Spezifisches Verbrauchskennfeld (links), statischer Absolutverbrauch in Abhängigkeit von der Leistung (rechts).....	58
Abbildung 3-12:	Arbeitspunkte des Motors im Vergleich der statischen gegenüber der dynamischen Betrachtungsweise (1..Leistungsreserve, 2..Mehrleistung bei Beschleunigung, 3..Minderleistung bei Verzögerung)	59
Abbildung 3-13:	Wirkungsgradkennfeld Fahrmotor [Ste10a], S. 43).....	63
Abbildung 3-14:	Verlauf von Bremskraft- und Bremsleistung für eine Bremsung aus 160 km/h unter Vernachlässigung der Fahrwiderstände.....	66
Abbildung 3-15:	Ersatzschaltbilder (links: Batterie, rechts: Doppelschichtkondensator).....	68
Abbildung 3-16:	Approximation von gemessenen Entladekurven (nach Messdaten [Saf05c]) ..	69
Abbildung 3-17:	IUA-Ladung für eine Lithium-Ionen-Zelle ($Q_{\text{nom}}=1 \text{ Ah}$) (nach [JW06], S. 195)	70
Abbildung 3-18:	Programmbenutzeroberfläche (Registerkarte: Zugparameter 1).....	73
Abbildung 3-19:	Anpassung der Geschwindigkeitsrestriktionen an die Zuglänge (nach [Wit11])	75
Abbildung 3-20:	Leistungsdefinition und Verlustabbildung im dieselelektrischen System	77
Abbildung 3-21:	Blockschaltbild Leistungs- und Verbrauchskalkulation	78
Abbildung 3-22:	Ausgabe einer Berechnung der Zwischenkreisleistung ausgehend von der Fahrzeuggbewegung und den Radkräften	79
Abbildung 3-23:	Beschleunigungsverhalten in Ausrollphasen.....	83
Abbildung 3-24:	Vergleich der ermittelten Fahrwiderstände mit Fahrwiderstandsrechnungen .	84
Abbildung 3-25:	Ausrollvorgänge, oben: Simulation für die Abschnitte A und B ; unten: Mit Variation der Windgeschwindigkeit an Ausschnitt C [Wit11]	85
Abbildung 3-26:	Vergleich der Volllastbeschleunigung bei Messung und Simulation ([Wit11], S. 60)	86
Abbildung 3-27:	Vergleich des Fahrtverlaufs zwischen Messfahrt und Simulation unter Anwendung der möglichen Fahrregime	87
Abbildung 4-1:	Beispielhafte Darstellung der Rückwärts- und Vorwärtsrekursion der dynamischen Programmierung (die eingezeichnete Vorwärtsrekursion beginnt in $k=i$ im Zustand x^i)	93

Abbildung 4-2:	Darstellung der Wirkungsweise eines Fahrerassistenzsystems inklusive möglicher bei der Prädiktion nicht bekannter Störgrößen.....	95
Abbildung 4-3:	Rekuperatives Verzögern im Vergleich mit klassischen Fahrregimen für dieselbetriebene Fahrzeuge.....	100
Abbildung 4-4:	Parameter zur Beschreibung des Fahrtverlaufs (nach [Zim11]).....	102
Abbildung 4-5:	Schematischer Ablauf der sukzessiven Approximation	103
Abbildung 4-6:	Prinzip der Wegschrittanpassung	108
Abbildung 4-7:	Eingeschränktes Gitter für die Optimierung über die DP.....	109
Abbildung 4-8:	DP-Optimierungsergebnis (flache Strecke)	110
Abbildung 4-9:	Leistungsverlauf und Kraftstoffverbrauch pro Wegschritt (Fahrzeit 280 s) ..	110
Abbildung 4-10:	Darstellung der Fahrtrajektorien in Abhängigkeit von der Diskretisierung ...	111
Abbildung 4-11:	Kraftstoffverbrauch für verschiedene Mehrfahrzeiten.....	112
Abbildung 4-12:	Optimierte Fahrtrajektorien für eine stark hügelige Strecke.....	113
Abbildung 4-13:	Leistungsverlauf verschiedener Fahrtrajektorien aus der DP.....	113
Abbildung 4-14:	Fahrschaubilder der energiesparenden Fahrweise im Vergleich zur schnellsten Fahrt	114
Abbildung 4-15:	Schematische Darstellung von Speicherstrategien für ein dieselelektrisches Fahrzeug mit Doppelschichtkondensator in Abhängigkeit des Speicherladezustands (SOC) und den Leistungsanforderungen an das Fahrzeug (P/P_{nenn})	117
Abbildung 4-16:	Zustandsautomat für die Speichersteuerung eines dieselelektrischen Fahrzeugs (schematisch)	118
Abbildung 4-17:	Notwendige Kraftstoffeinsparung pro Ladungsumsatz (Kraftstoffpreis 1,25 €/l).....	121
Abbildung 4-18:	Auswirkung des Entladefaktors auf den Verlauf des energetischen Ladezustands	122
Abbildung 4-19:	Vergleich verschiedener Booststrategien für eine flache Strecke.....	123
Abbildung 4-20:	Ablauf der Rekursion bei der Anwendung der dynamischen Programmierung für die Speichersteuerung	126
Abbildung 4-21:	Ergebnis einer dynamischen Programmierung (20 kWh nutzbare Speicherenergie, flache Strecke).....	127
Abbildung 4-22:	Verlauf des Ladezustands in Abhängigkeit von λ im Vergleich mit dem Ergebnis der dynamischen Programmierung (nahezu unbegrenzter Speicher)	128

Abbildung 4-23:	Kraftstoffverbrauch der ECMS in Abhängigkeit von λ im Vergleich mit der dynamischen Programmierung (nahezu unbegrenzter Speicherinhalt).....	129
Abbildung 4-24:	Ergebnis der ECMS mit konstantem Äquivalenzkostenfaktor λ (oben), unten: Fahrprofil repräsentiert durch Fahrgeschwindigkeit und elektrische Zwischenkreisleistung bei flacher Strecke (unten)	130
Abbildung 4-25:	Kraftstoffverbrauch der ECMS in Abhängigkeit von λ im Vergleich mit der dynamischen Programmierung (begrenzter Speicher).....	131
Abbildung 4-26:	Äquivalenzkostenmatrix mit Verlauf der optimalen Fahrtrajektorie ($SOC(t_A)=SOC(t_E)=0,7$)	132
Abbildung 4-27:	Äquivalenzkostenfaktor der optimalen vorausschauenden Betriebsstrategie über der Zeit und resultierender Betriebsverlauf des Speichers.....	133
Abbildung 4-28:	Relative Verbrauchseinsparung bei verschiedenen Betriebsstrategien (flache Strecke, Länge 10 km, ein Halt, Nutzenergie 20 kWh)	135
Abbildung 4-29:	Energiedurchsatz bei verschiedenen Speichertypen und Betriebsstrategien (flache Strecke, Länge 10 km, ein Halt, Nutzenergie 20 kWh)	135
Abbildung 4-30:	Variation der Fahrzeit (Ausrollen mit Fahrtzeitverlängerung)	137
Abbildung 4-31:	Kraftstoffverbrauch einer einfachen Rekuperationsstrategie (volle Entladeleistung) und der ortsbasierten Prädiktion basierend auf dem Ausgangsfahrspiel in Relation zu einer vollständigen Prädiktion des aktuellen Fahrspiels für unterschiedliche Fahrtverläufe.....	138
Abbildung 4-32:	Darstellung des Speicherladezustands und der Speicherverläufe bei einer Mehrfahrzeit von 40 s	138
Abbildung 4-33:	Entstehende Fahrschaubilder bei Nutzung der sukzessiven Approximation mit Speicherfahrzeugen (Mehrfahrzeit 20 s, entspricht ca. 5 %)	141
Abbildung 4-34:	Vergleich des Kraftstoffverbrauchs bei Einsatz des HE-Li-Ionen-Speichers mit und ohne Einsatz des Fahrregimes Rekuperation bei verschiedener Fahrzeitreserve	142
Abbildung 4-35:	Kraftstoffverbrauch bei Speichereinsatz über der Fahrzeitreserve (Speicheroptimierung über regelbasierte Rekuperationsstrategie)	143
Abbildung 4-36:	Energiedurchsatz der Speicher in Abhängigkeit von der Fahrzeitreserve (Speicheroptimierung über regelbasierte Rekuperationsstrategie)	143
Abbildung 4-37:	Fahrschaubild in Abhängigkeit vom Boostfaktor (gleiche Fahrzeit)	144
Abbildung 4-38:	Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von Boostfaktor und Fahrzeit	145

Abbildung 5-1:	Integration einer Mehrmaschinenanlage in eine Lokomotive mit Mittelgang [Lan11].....	148
Abbildung 5-2:	Energie- und Informationsfluss im Antriebsstrang der Mehrmotorenlokomotive	149
Abbildung 5-3:	Stellmöglichkeiten einer betriebsoptimalen Steuerung.....	152
Abbildung 5-4:	Darstellung der Muschelkurven des spezifischen Kraftstoffverbrauchs für den untersuchten Dieselmotor [BT10] mit verschiedenen Generatorkennlinien .	153
Abbildung 5-5:	Darstellung der Differenz des leistungsabhängigen Kraftstoffverbrauchs zum Minimalverbrauch in Abhängigkeit von der verwendeten Generatorkennlinie	153
Abbildung 5-6:	Optimale Motorlastverteilung (links: ohne Start/Stopp, rechts: mit Start/Stopp, oben: freie Drehzahlstellung, unten: ungesteuerte Gleichrichter)	155
Abbildung 5-7:	Normierter kumulierter Kraftstoffverbrauch in repräsentativen Lastpunkten	156
Abbildung 5-8:	Vorschlag für ein Regelungskonzept zur Umsetzung der Betriebsstrategie...	156
Abbildung 5-9:	Dynamische Simulation auf verschiedenen Modellebenen.....	158
Abbildung 6-1:	Schema der Verbesserung der LCC mit Hilfe der mehrkriteriellen Optimierung (nach [Zim11], S. 34)	160
Abbildung 6-2:	Pareto-Front ([SZB11], S. 5)	163
Abbildung 6-3 :	Prinzip der evolutionären Algorithmen (nach [Poh00], S. 10, modifiziert)....	164
Abbildung 6-4:	Ableitung der Ansatzfunktionen für die Leistungsparameter von Li-Ionen-Speichern (nach [Zim11], [Saf08], [Ros09])	167
Abbildung 6-5:	Auswirkung der Parametervariation auf die einzelnen Kostenbestandteile (Maximaldifferenz).....	169
Abbildung 6-6:	Einfluss der Fahrzeitreserve auf die Bestandteile der LCC	171
Abbildung 6-7:	Optima diskreter Werte aus der erschöpfenden Suche für verschiedene Gewichtungen der LCC	173
Abbildung 6-8:	Entwurfsbereich und Beispielkonfiguration	174
Abbildung 6-9:	Verwendetes Streckenprofil	175
Abbildung 6-10:	Paretofront.....	176
Abbildung 6-11:	2D-Ansicht der Paretofront mit Darstellung ausgewählter normierter Entwurfsvektoren	177

Abbildung 6-12:	Verlauf der Einzel- und Gesamtkosten über den Bereich der Entwurfsvariablen.....	177
Abbildung A-1:	Lebensdauer in vollen Ladungsumsätze als Funktion von der Entladetiefe (DOD) in Prozent [Ros09].....	205
Abbildung A-2:	Lebensdauer von High-Power-Li-Ionen-Zellen in Abhängigkeit von der Temperatur [Ros09].....	205
Abbildung A-3:	Ragone Plot [Sau09]	206
Abbildung A-4:	Hauptstromblockschaltbild der TRAXX DE ([LBJ+10], S. 34).....	206
Abbildung A-5:	Schematische Zuordnung der Messgrößen aus der Messfahrt HH-CXH ([Wit11], [Sch10])	209
Abbildung A-6:	Messfahrt mit ausgewählten Validierungspunkten (Messfahrt CXH-HH: 08.12. 1. Fahrt).....	209
Abbildung B-1:	Berechnung dynamisches Modell	210
Abbildung B-2:	Generatorwirkungsgrad [VEM06].....	211
Abbildung B-3:	Aufstellung der Kostenelemente der Lebenszykluskosten ([Zim11], S. 40)...	212
Abbildung C-1:	Simulationsergebnisse (nach Messdaten HH-CXH: 08.12. 1. Fahrt)	213
Abbildung C-2:	Rückgang der Motordrehzahl nach Lastabschaltung (nach Messdaten HH-CXH: 08.12. 1. Fahrt).....	214
Abbildung C-3:	Optimierungsergebnisse der DP in Abhängigkeit von der Zeit- und Geschwindigkeitsschrittweite (flache Strecke).....	214
Abbildung C-4:	Optimierungsergebnisse der DP in Abhängigkeit von der Wegschrittweite (flache Strecke)	215
Abbildung C-5:	Leistungsverlauf und Kraftstoffverbrauch pro Wegschritt in Abhängigkeit von der Diskretisierung bei Einsatz der DP für die Fahrtoptimierung	215
Abbildung C-6:	Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Fahrtzeit (hügelige Strecke) ...	216
Abbildung C-7:	Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Fahrzeitreserve für verschiedene Berechnungsmethoden (ohne Berücksichtigung des Verbrauchs während Haltezeiten).....	216
Abbildung C-8:	Fahrtrajektorien- und Leistungsbedarf für die energiesparende Fahrweise mit Hilfe der regelbasierten Trajektorienoptimierung und der DP	217
Abbildung C-9:	Verbrauchs differenz gegenüber der Fahrt ohne Speicher in Abhängigkeit von der Mehrfahrzeit (Speicheroptimierung über DP).....	217

Abbildung C-10:	Sensitivitätsanalyse Streckenparameter und ökonomische Randbedingungen	218
Abbildung C-11:	Sensitivitätsanalyse Zugparameter und Speichersteuerung.....	219

8.3 Tabellen

Tabelle 2-1:	Ausgewählte technischer Daten der TRAXX P 160 DE Typ LNVG ([LBJ+10], S. 100 ff.)	11
Tabelle 2-2:	Darstellung ausgewählter technischer Daten der Doppelstockwagen aus Görlitz [Typenschild]	11
Tabelle 2-3:	Übersicht über die Nebenaggregate	14
Tabelle 2-4:	Typische Kenngrößen für Zugverbindungen [eigene Recherchen, siehe Tabelle A-2]	15
Tabelle 2-5:	Bewertung der Anforderungen an Energiespeicher in Abhängigkeit von ausgewählten Betriebszielen.....	22
Tabelle 2-6:	Überblick über verschiedene Typen von Batteriezellen (nach [Bau09], [JW06], [Vog09], [LNG+08])	29
Tabelle 2-7:	Gegenüberstellung verschiedener Energiespeicher (eigene Recherche in Datenblättern, [Jan08], [Sch08b], [JW06], [Sau09], [Saf05a])	31
Tabelle 3-1:	Gegenüberstellung der Möglichkeiten zur Verbrauchsevaluation von Fahrzyklen.....	50
Tabelle 3-2:	Aufbau einer Streckendatei.....	74
Tabelle 3-3:	Verzögerungskoeffizienten und daraus ermittelte Fahrwiderstandskoeffizienten für zwei verschiedene Approximationsverfahren	83
Tabelle 4-1:	Einfluss des Entladefaktors auf die Verbrauchseinsparung (Begrenzung der maximalen Speicherleistung durch DC/DC-Wandler: 2 MW, nominelle Speicherenergie: 20 kWh, flache Strecke, schnellste Fahrt)	122
Tabelle 4-2:	Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit vom Vorhaltegrad.....	124
Tabelle 4-3:	Verbrauchseinsparung bei verschiedenen Speichertypen und Betriebsstrategien (flache Strecke, 10 km, ein Halt, 20 kWh Nutzenergie)	134
Tabelle 4-4:	Übersicht über Betriebsstrategien und deren Merkmale	140
Tabelle 6-1:	Darstellung der untersuchten Einflussgrößen mit den entsprechenden Stützstellen.....	168
Tabelle 6-2:	Darstellung der Einflussgrößen mit entsprechenden untersuchten Werten ..	172

Tabelle A-1:	Übersicht über verschiedene Energieverbrauchsberechnungsprogramme	203
Tabelle A-2:	Vergleich von Strecken hinsichtlich des Haltestellenabstands	204
Tabelle A-3:	Übersicht aufgezeichneter Messgrößen [Sch10].....	207
Tabelle B-1:	Aufstellung der Fahrzeugmassen.....	210
Tabelle B-2:	Parametrierung der für die Energiesimulation verwendeten Speicher.....	211

A. Ergänzende Informationen

Tabelle A-1: Übersicht über verschiedene Energieverbrauchsberechnungsprogramme

Programmname	Besitzer/Lizenznnehmer (Auszug)	Kurzbeschreibung
Dynamis [Gil11]	Ingenieurgesellschaft für Verkehrs- und Eisenbahnenwesen	Berechnung von Fahrdynamik und Energiebedarf für Triebfahrzeuge und Züge
Ecotranz [UW03]	Bombardier Transportation	Simulationsprogramm für elektrische und dieselbetriebene Fahrzeuge
Elbas Sinaset® [HKR02] und Webanet [HKR03]	Elbas/Alstom	Simulationsprogramm für elektrische Bahnen im Nah- und Fernverkehr inklusive Netzberechnung
Energoplan [Fou09]	Bombardier Transportation	Vereinfachte Fahrzeugabbildung, Optimierung der Auslegung von Unterwerken
Fabel [ENO07]	Enotrac	Simulation fahrleitungsgebundener Verkehrssysteme
Fahrzeitkalkulation [Reu07]	Bombardier Transportation	Berechnung von Fahrzeit und Kraftstoffverbrauch von Dieselfahrzeugen
Intens	Bombardier Transportation	Zugfahrt- und Energieverbrauchssimulation, Fokus auf der Auslegung von Stromrichtern
Openpowernet, Opentrack [Ste10b]	IFB Institut für Bahntechnik, IBB (TU Dresden)	Co-Simulation von Zugmodellen, Fahrplänen und elektrischem Netz
Sidytrac [Sie10]	Siemens	Simulation von Fahrzeug und Netz
TEP-Train Energy Performance [LS08],[MOS10]	Bombardier Transportation	Simulationsprogramm für die energetische Berechnung von Triebfahrzeugen und lokomotivbespannten Zügen
Tramnet [Pap10]	Bombardier Transportation	Energieberechnung von Straßen- und U-Bahnen mit Energiespeicher

Tabelle A-2: Vergleich von Strecken hinsichtlich des Haltestellenabstands

Strecke	Antrieb⁷²	Typ	Fahrzeit [min]	Länge [km]	Haltestellenzahl [Stopps]	Stoppfrequenz [Stopp/min]	Stoppabstand [km]
Dresden Hbf- DD Flughafen	E	S	46	32,1	17	0,36	1,9
Dresden Neustadt-Leipzig	E	RE	94	116,4	15	0,16	7,8
Dresden Nürnberg	DH	RE	260	334,7	20	0,08	16,7
Dresden-Tharandt	E	S	18	13,7	7	0,39	2
Dresden-Freiberg	E	RB	42	40,1	11	0,26	3,6
Dresden-Freiberg	E	RE	31	40,1	4	0,13	10,0
Dresden-Görlitz	DM	RB	100	103,6	23	0,23	4,5
Dresden-Görlitz	DH	RE	78	103,6	9	0,12	11,5
Hamburg-Cuxhaven (Metronom)	DE	RE	102	117,2	12	0,12	9,8
Hamburg-Stade	E	S	62	54,4	12	0,2	4,5
Meissen Triebischtal-Schöna	E	S	109	77	29	0,27	2,66

⁷² DH .. dieselhydraulisch, DE .. dieselelektrisch, DM .. dieselmechanisch, E .. elektrisch

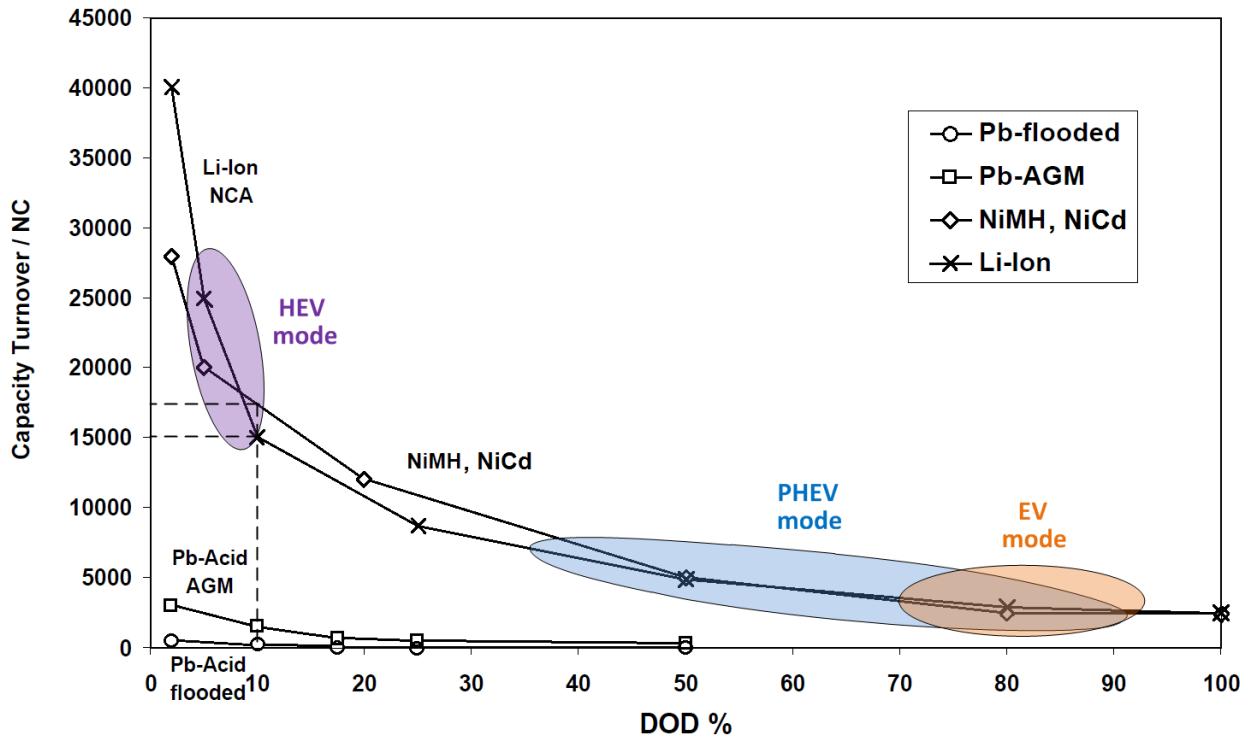


Abbildung A-1: Lebensdauer in vollen Ladungsumsätze als Funktion von der Entladetiefe (DOD) in Prozent [Ros09]

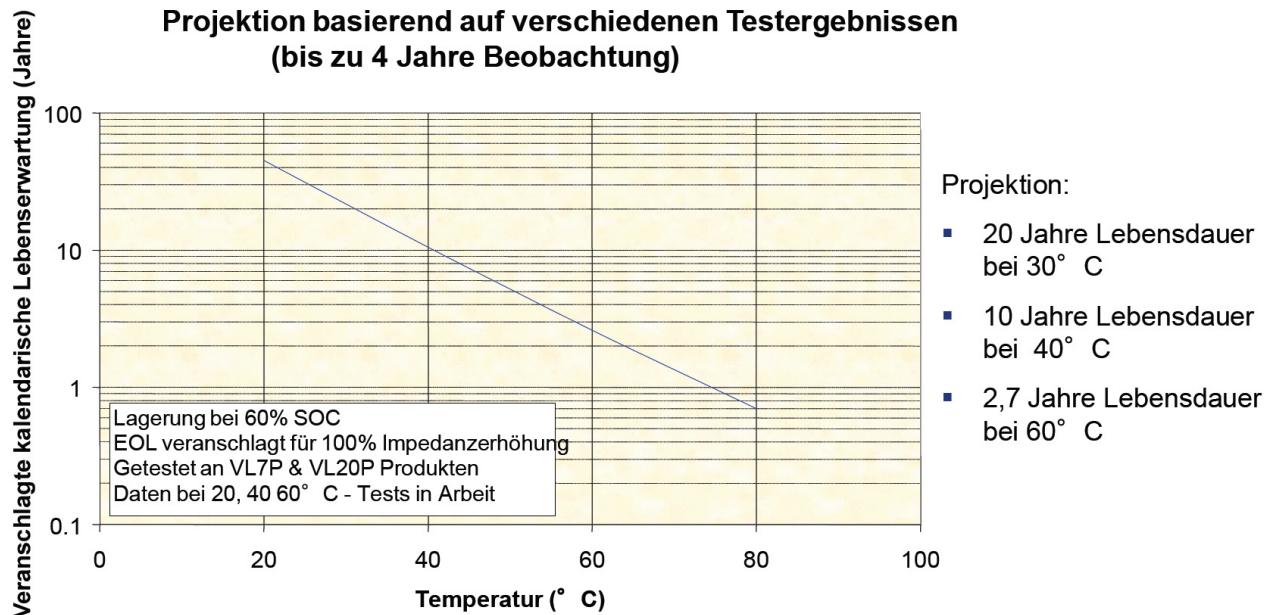


Abbildung A-2: Lebensdauer von High-Power-Li-Ionen-Zellen in Abhängigkeit von der Temperatur [Ros09]

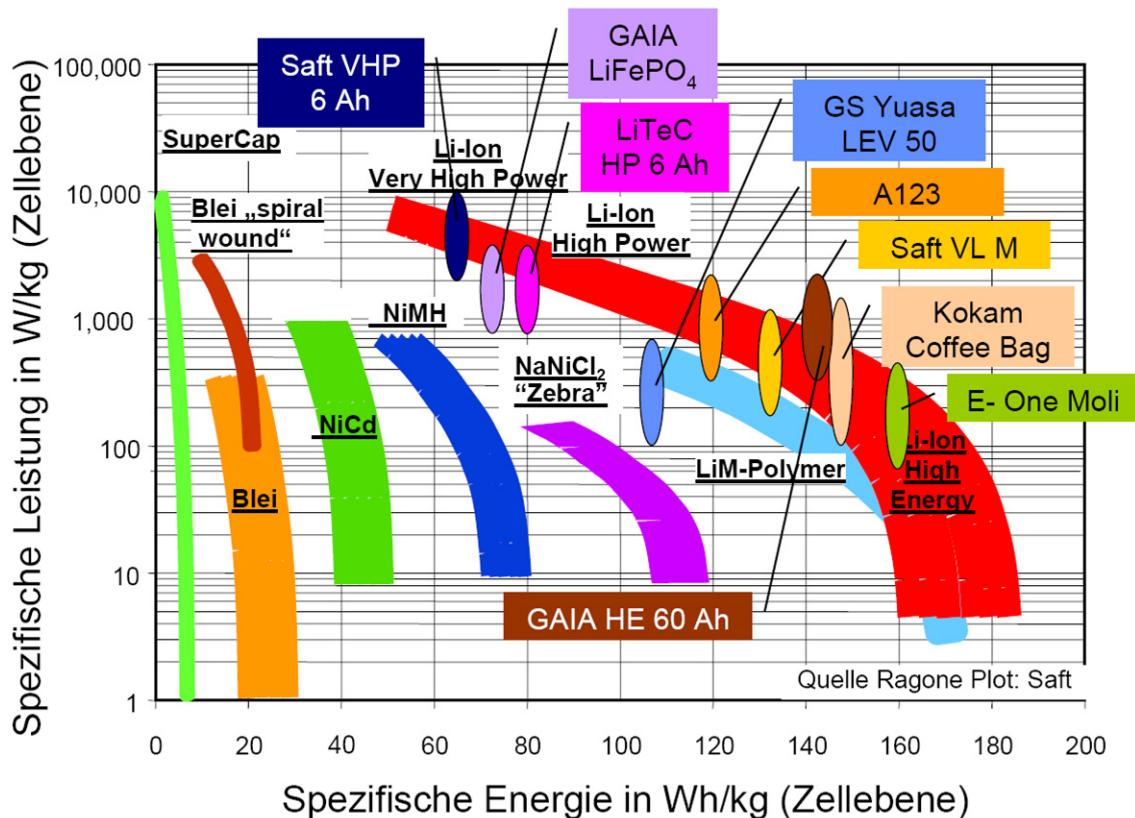


Abbildung A-3: Ragone Plot [Sau09]

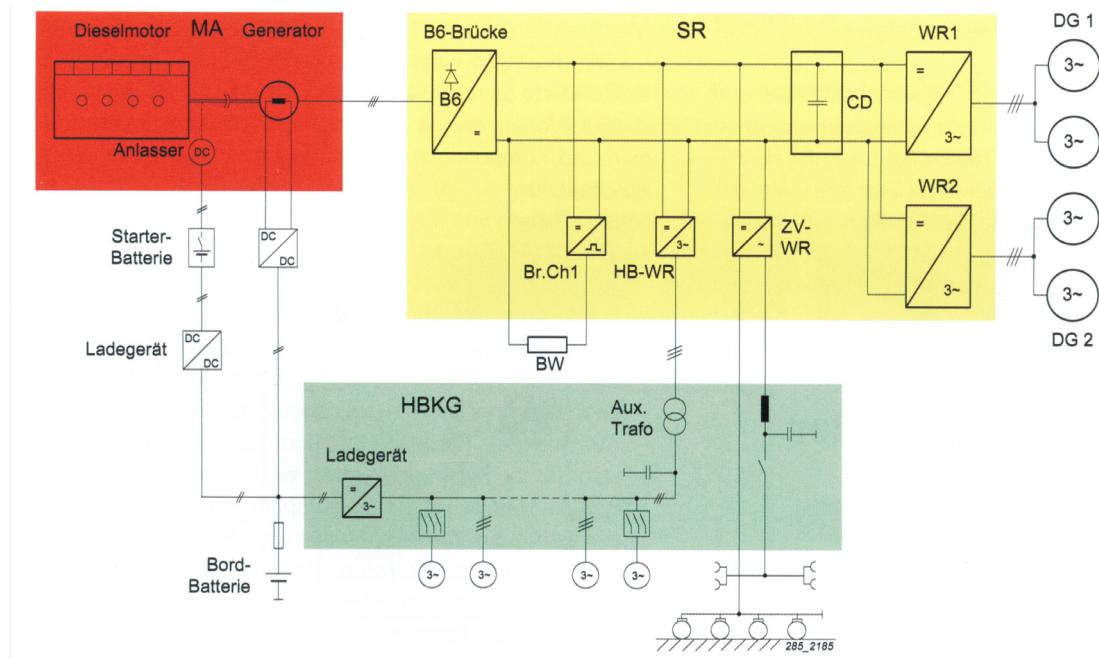


Abbildung A-4: Hauptstromblockschaltbild der TRAXX DE ([LBJ+10], S. 34)

Tabelle A-3: Übersicht aufgezeichneter Messgrößen [Sch10]

Bezeichnung	Messgröße	Einheit
Zeit	t	s
Weg	s	m
Fahrgeschwindigkeit	v	km/h
Name der Messfahrt	name	-
Zuginformationen -train		
Beschleunigung	a	m/s ²
Zustand Traktion aktiv/inaktiv	trac_bit	-
Zustand Bremsen aktiv/inaktiv	brake_bit	-
Zugkraft Fahrhebel	trac_force	-
Bremszylinderdruck DG I	brake_p_1st_bogie	bar
Bremszylinderdruck DG II	brake_p_2nd_bogie	bar
Druck Hauptluftleitung	brake_p_pipe	bar
Druck HBL	brake_p	bar
mechanische Bremse angelegt	brake_mech_p	-
Kompressor aktiv/inaktiv	brake_comp_bit	-
Dieselmotorgeneratorsatz -diegen		
mechanische Leistung VKM	P_mech_PWA	kW
Drehzahl	n	1/min
Spannung Drehstromkreis	U	V
Strom in Generatorphase R,S,T	I_R,S,T	A
elektrische Leistung am Generator	P_el	kW
Ladedruck	p_ca	bar
Ladelufttemperatur vor Turbolader	T_suck	°C
Ladelufttemperatur an Motoreintritt	n_TC	°C
Lastsignal VKM	P_perc	-
Erregerstrom	I_err	A
Signal Tankfüllstand	fuel_tank	%
Hochtemperaturkreislauf -ht		
Temperatur am Motoraustritt	T_cl	°C
Zugenergieversorgung - aux_train		
Zugsammelschienenspannung	V	V
Zugsammelschienenstrom	I_Schein	A
Zugsammelschienenleistung	P	VA
Gleichrichter - DC_chop		

Phasenstrom R,S,T	I_R,S,T	A
Temperatur	T_cl	°C
Gleichstromzwischenkreis - DCL		
Spannung	U	V
Elektrische Leistung	P	kW
Fahrmotoren - trac_mot		
Zugkraft Drehgestell 1	F_Bogie1	N
Zugkraft Drehgestell 2	F_Bogie2	N
Temperatur Fahrmotor 1,2,3,4	temp_1,2,3,4	°C
Fahrmotorlüfter Stufe langsam aktiv/inaktiv	fan_slow	-
Fahrmotorlüfter Stufe schnell aktiv/inaktiv	fan_fast	-
Bremswiderstand - BR		
Leistungsaufnahme	P	kW
Bremswiderstandslüfter Stufe langsam aktiv/inaktiv	fan_slow	-
Bremswiderstandslüfter Stufe schnell aktiv/inaktiv	fan_fast	-
Hilfsbetriebeumrichter - aux_con		
Spannung am Umrichter	U	V
Wechselspannungsfrequenz	f	Hz
elektrische Leistung (Scheinleistung)	P	kVA
GPS auf Lokomotive - GPS		
Geschwindigkeit	v	km/h

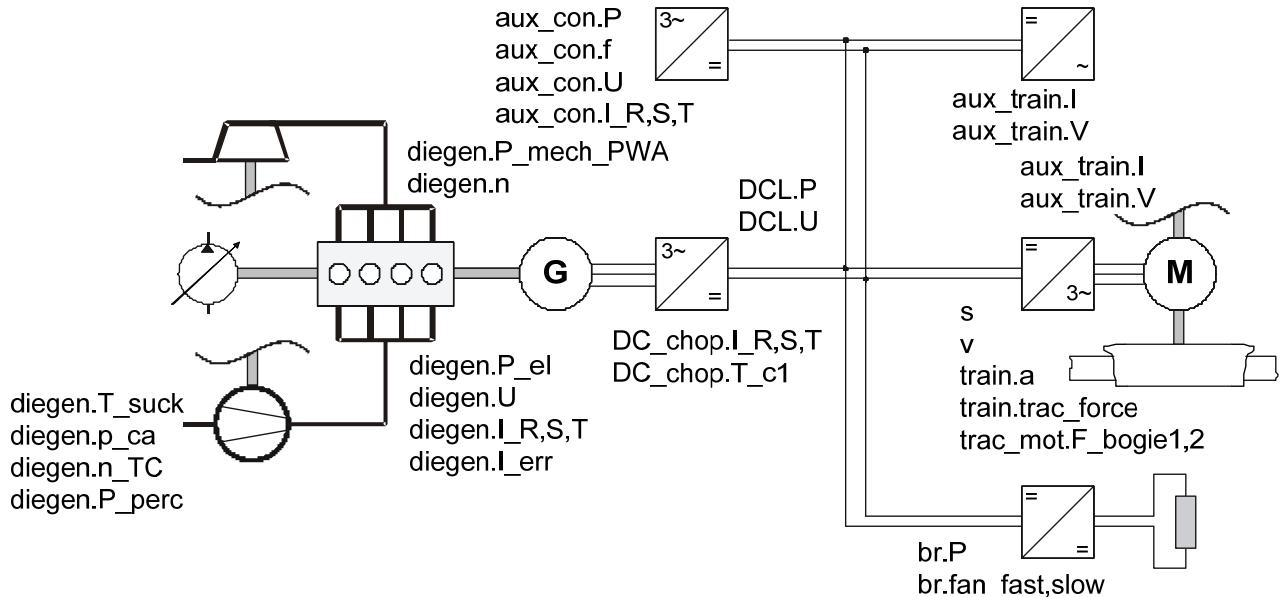


Abbildung A-5: Schematische Zuordnung der Messgrößen aus der Messfahrt HH-CXH ([Wit11], [Sch10])

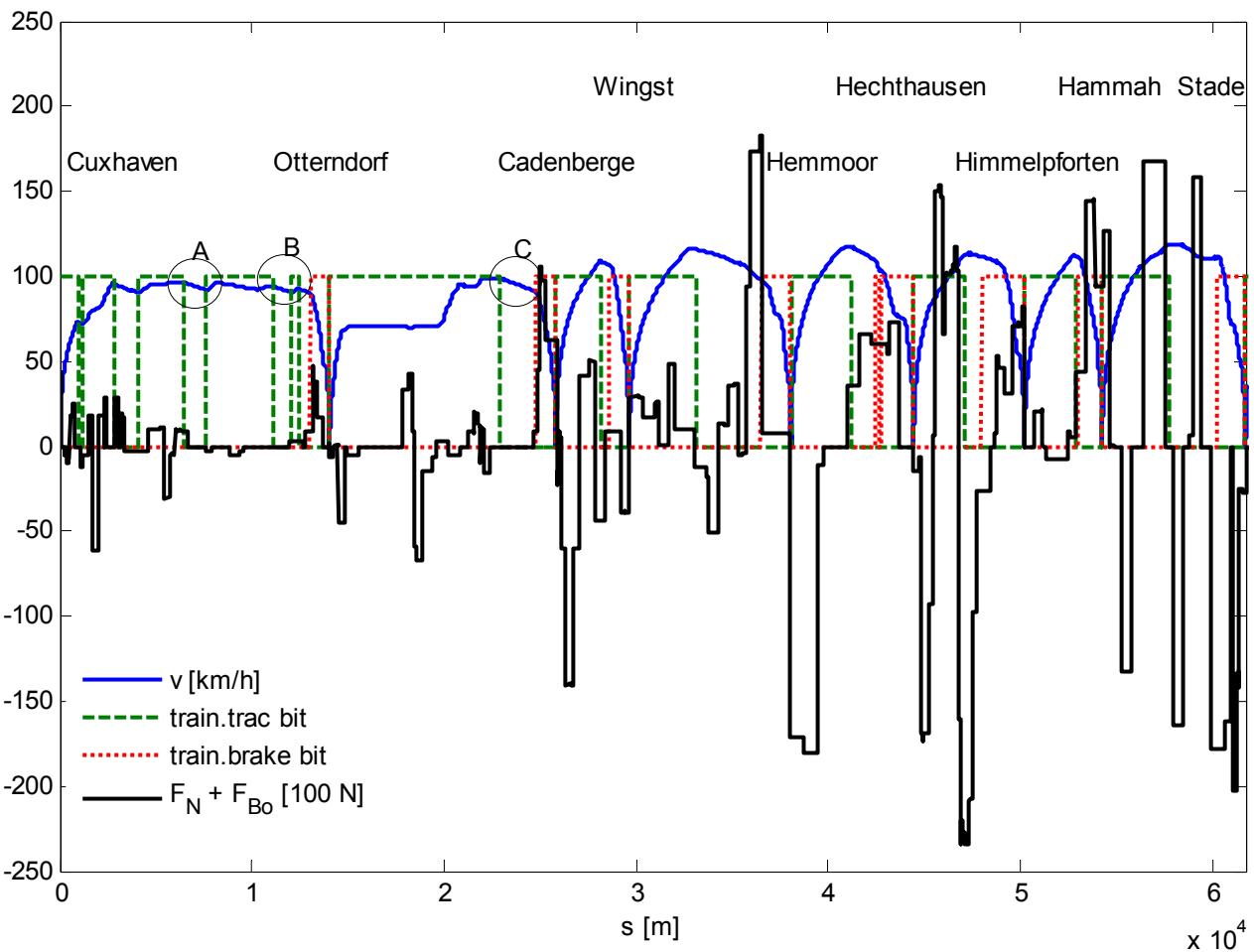
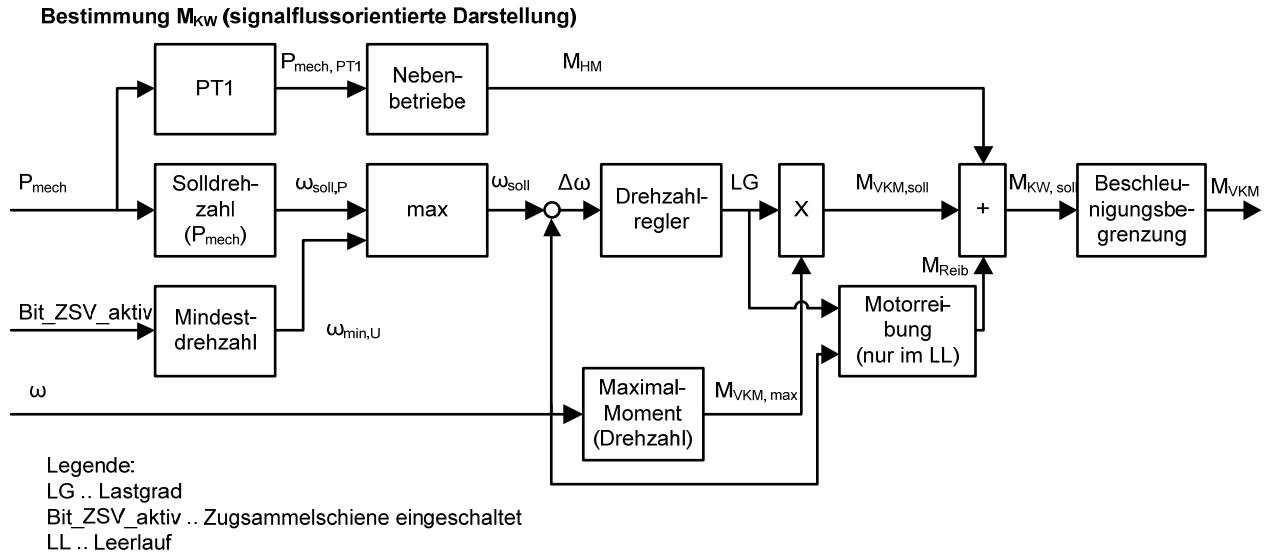


Abbildung A-6: Messfahrt mit ausgewählten Validierungspunkten (Messfahrt CXH-HH: 08.12. 1. Fahrt)

B. Simulationswerkzeug und Parameter



Bestimmung M_{GEN} (signalflussorientierte Darstellung)

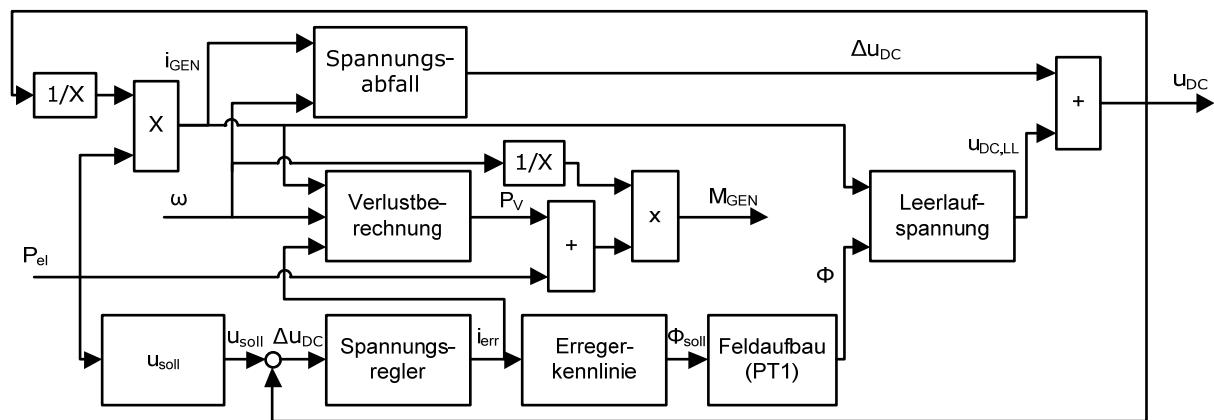


Abbildung B-1: Berechnung dynamisches Modell

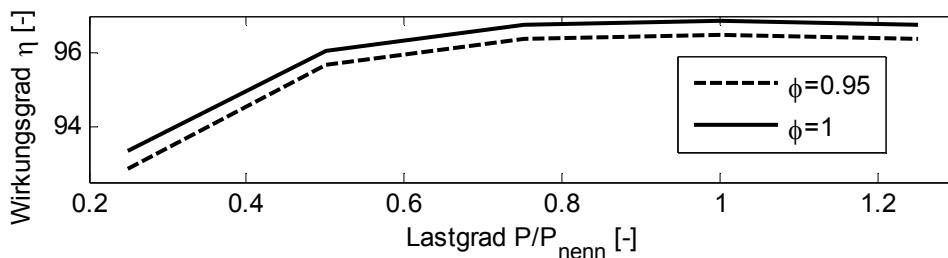
Tabelle B-1: Aufstellung der Fahrzeugmassen

Fahrzeug	Anzahl	Einzelmasse [kg]	Masse [kg] inkl. Vorräte und Passagiere*	Dynamischer Massenfaktor [-]	Dynamische Masse [kg]
Lok	1	80	82.217	1,08	88.794
Wagen	4	50.000	208.712	1,025	213.930
Steuerwagen	1	53.000	53.972	1,025	55.321
Gesamt			344.901		358.045

* Die Lokomotive wird mit 2/3 Vorräten und die Wagen mit dem gemittelten Belegungsgrad von 20 Prozent berechnet.

Tabelle B-2: Parametrierung der für die Energiesimulation verwendeten Speicher

	Doppelschichtkondensator	Li-Ionen-Batterie High Energy	Li-Ionen- Batterie High Power
Nennspannung $U_{SE,nenn}$ [V]	125	3,6	3,6
Innenwiderstand $R_{SE,i}$ [Ω]	0,018	0,0026	0,0033
Nennenergieinhalt $E_{SE,nenn}$ [Wh]	136,7	145,5	25,2
maximale Entladeleistung $P_{SE,i,entl,max}$ [W]	18.750	540	2.160
maximale Ladeleistung $P_{SE,i,l,max}$ [W]	18.750	147,6	216
Speichermasse m_{SE} [kg]	59,5	1,07	0,37
Massefaktor $k_{m,SE} = m_{Speicher ges} / m_{SE}$ [-]	$\sim 1,3^{73}$	$\sim 2,3^{74}$	$\sim 2,3$
verwendeter SOC-Bereich [-]	0,25 - 1	0,6 - 0,7	0,6 - 0,7
Entladewirkungsgrad (max. Dauerleistung) $\eta_{entl,min}$	0,978 bei SOC=1 0,914 bei SOC=0,25	0,892	0,45 ⁷⁵
Ladewirkungsgrad (max. Dauerleistung) $\eta_{l,min}$	0,979 bei SOC=1 0,92 bei SOC=0,25	0,971	0,948
basierend auf	Maxwell HTM 125 [Max08a]	Saft VL 41 M [Saf05b]	Saft VL 7P [Saf05a]

**Abbildung B-2: Generatorwirkungsgrad [VEM06]**

⁷³ Es handelt sich um ein komplettes Modul mit Luftkühlung, Batterieüberwachung und Rahmen ohne DC/DC-Umrichter.

⁷⁴ Die Relation von Zellgewicht zu kompletten Speichersystemen (Verbindungstechnik, Gehäuse, Batterieüberwachung und DC/DC-Umrichter) wird nach Recherche verschiedener realisierter Projekte mit Faktor 2,3 abgeschätzt. Dieser Wert ist stark abhängig von der konstruktiven Auslegung und dem verwendeten Kühlverfahren. Die Annahme muss in der Auslegungsphase verifiziert werden.

⁷⁵ Der wesentlich schlechtere Entladewirkungsgrad gegenüber der HE-Li-Ionen-Batterie liegt primär in der wesentlich höheren zulässigen Entladeleistung begründet.

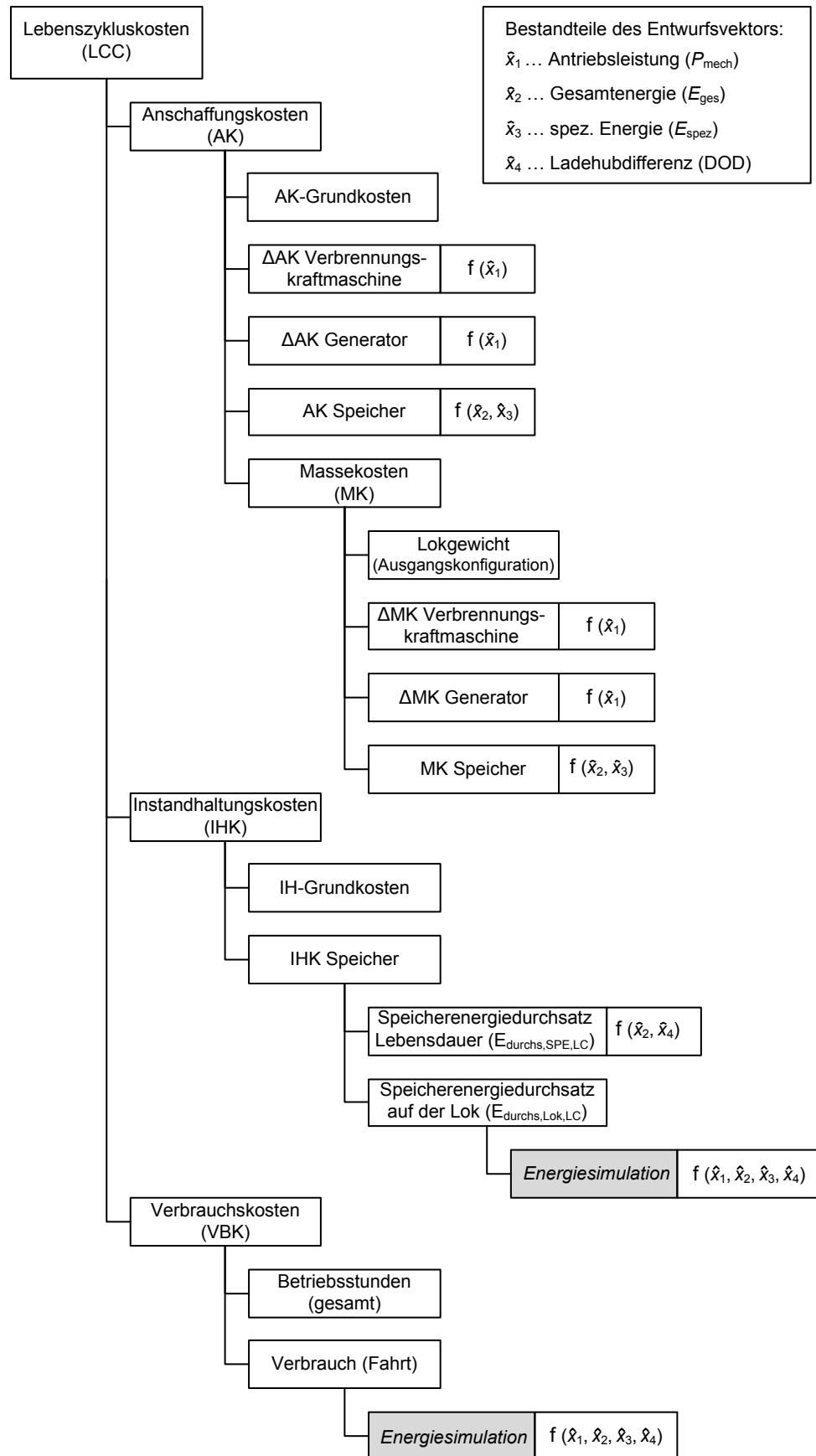


Abbildung B-3: Aufstellung der Kostenelemente der Lebenszykluskosten ([Zim11], S. 40)

C. Simulationsergebnisse

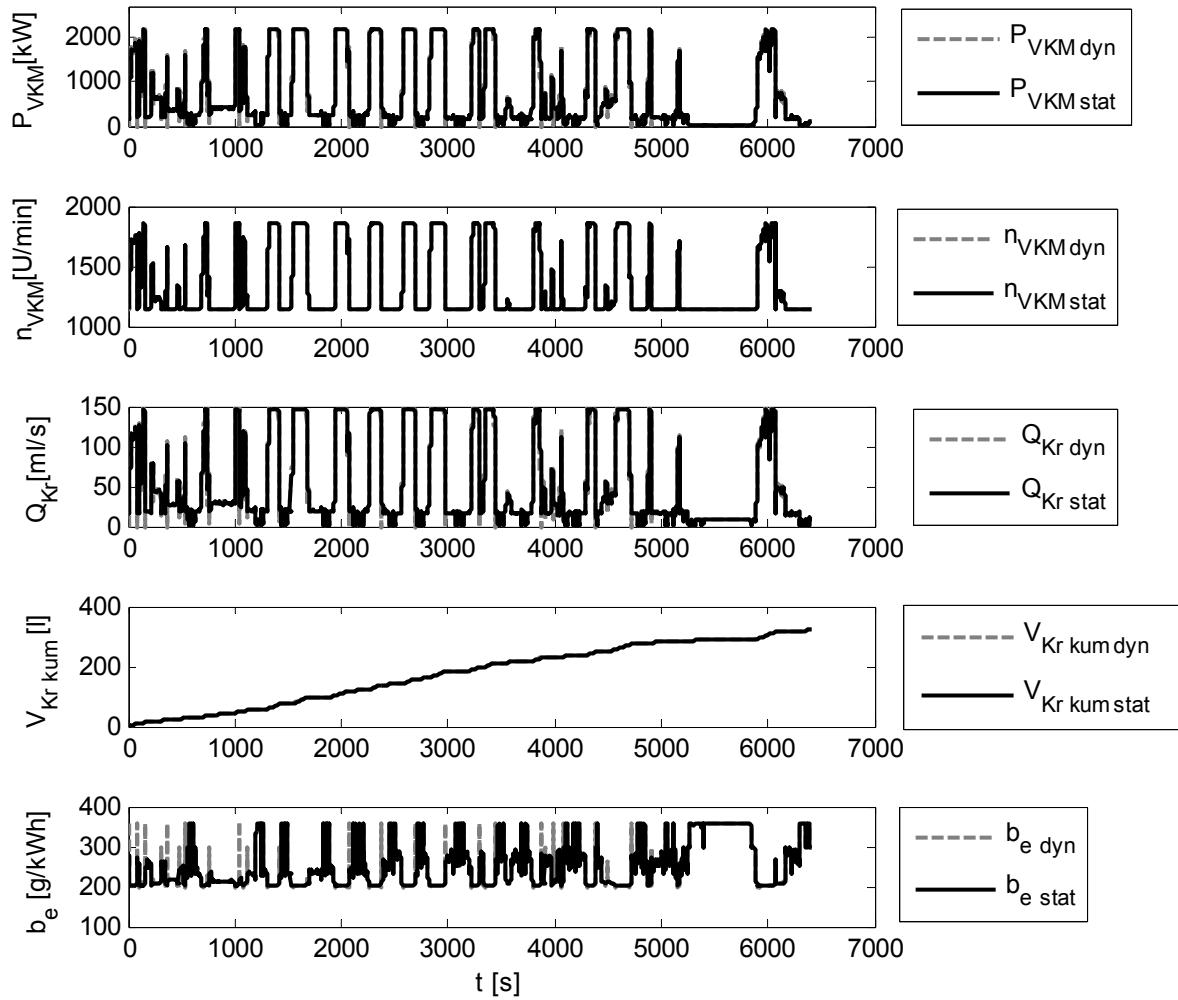


Abbildung C-1: Simulationsergebnisse (nach Messdaten HH-CXH: 08.12. 1. Fahrt)

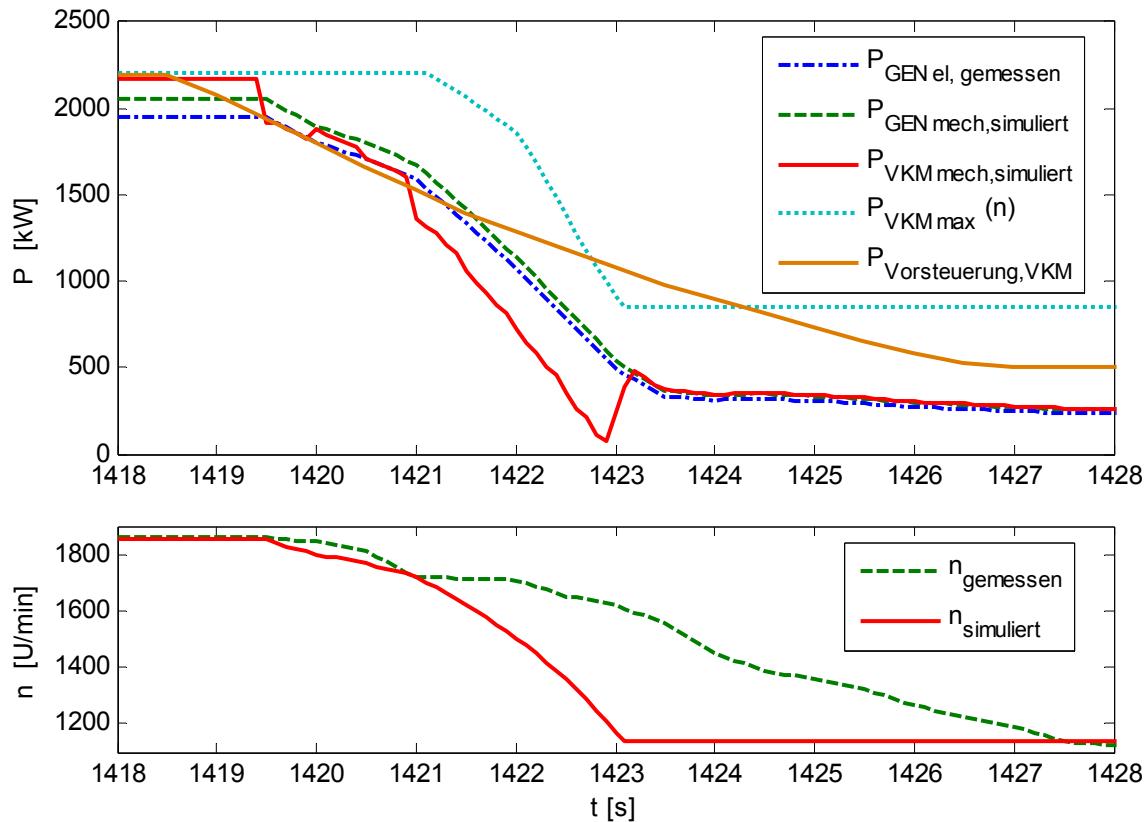


Abbildung C-2: Rückgang der Motordrehzahl nach Lastabschaltung (nach Messdaten HH-CXH: 08.12. 1. Fahrt)

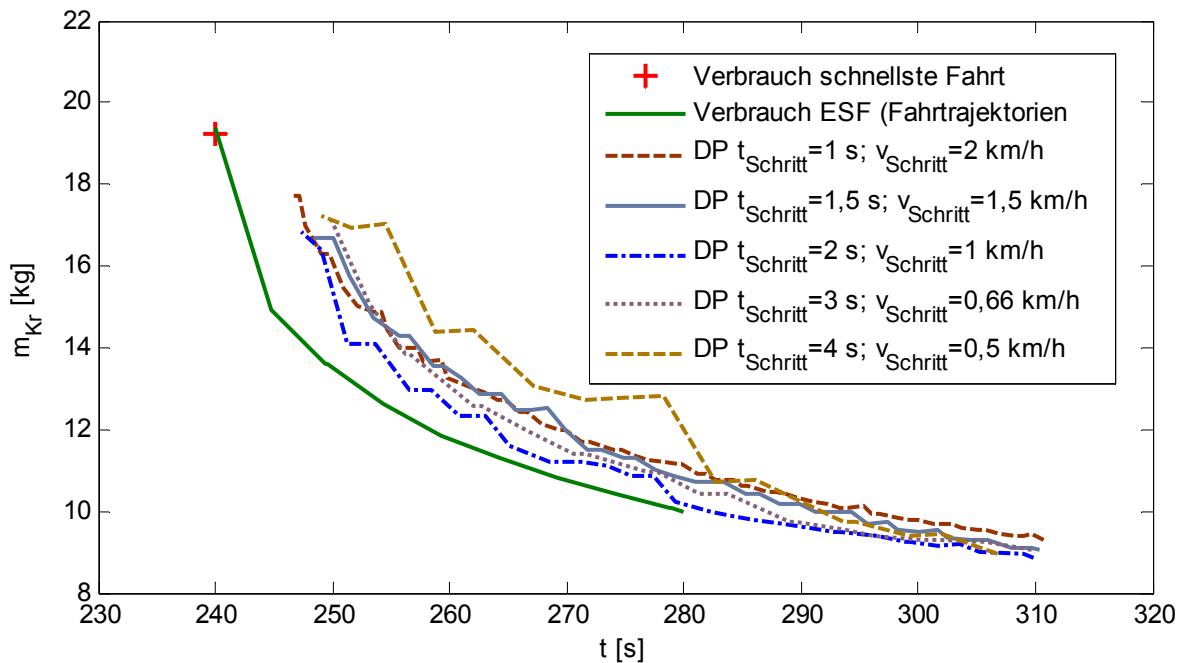


Abbildung C-3: Optimierungsergebnisse der DP in Abhängigkeit von der Zeit- und Geschwindigkeitsschrittweite (flache Strecke)

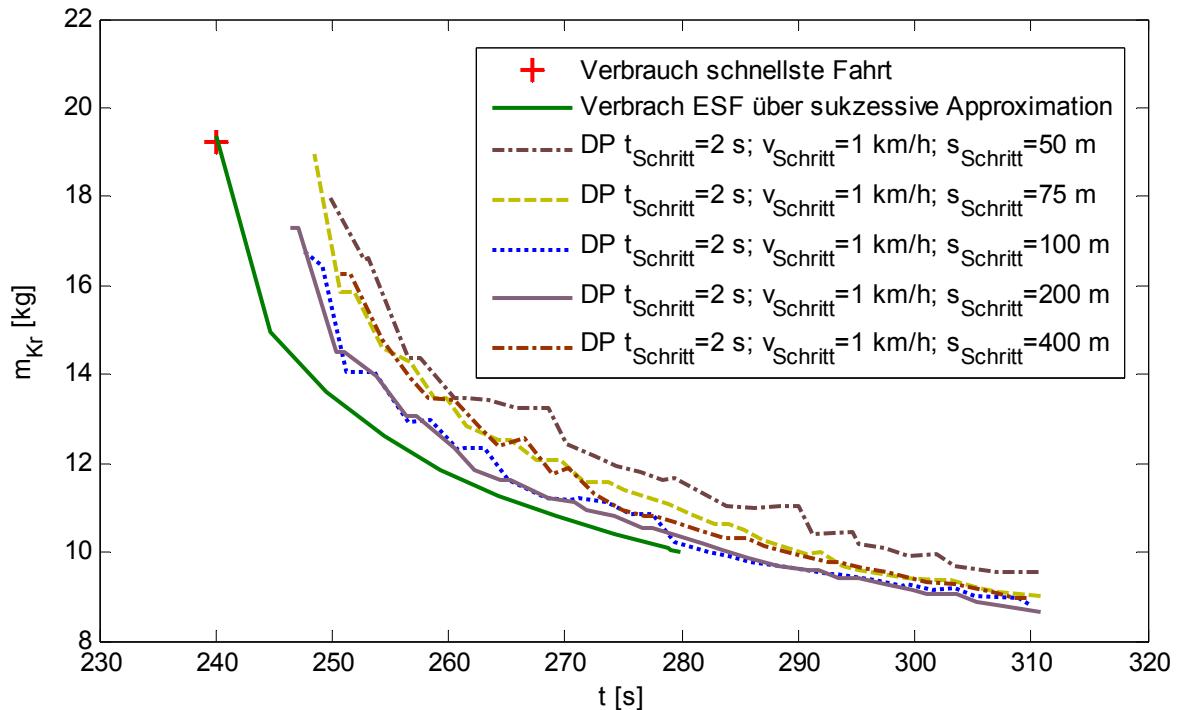


Abbildung C-4: Optimierungsergebnisse der DP in Abhängigkeit von der Wegschrittweite (flache Strecke)

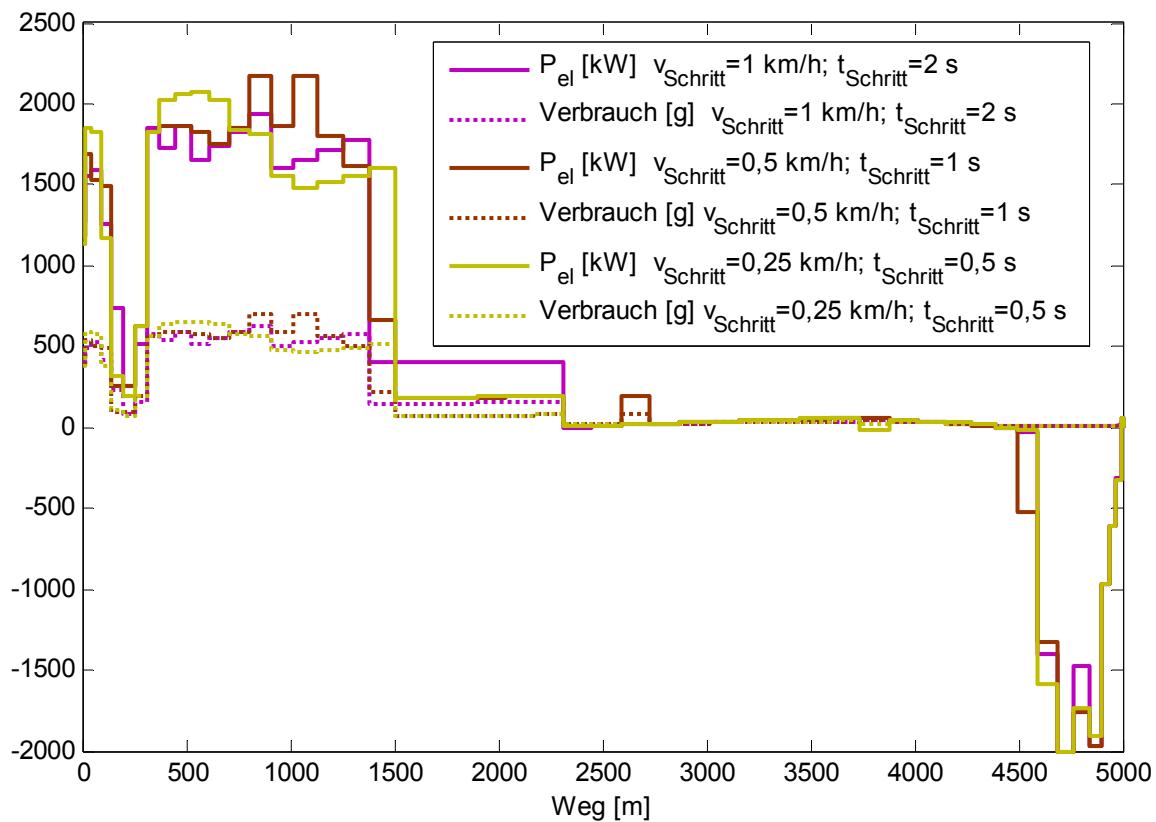


Abbildung C-5: Leistungsverlauf und Kraftstoffverbrauch pro Wegschritt in Abhängigkeit von der Diskretisierung bei Einsatz der DP für die Fahrtoptimierung

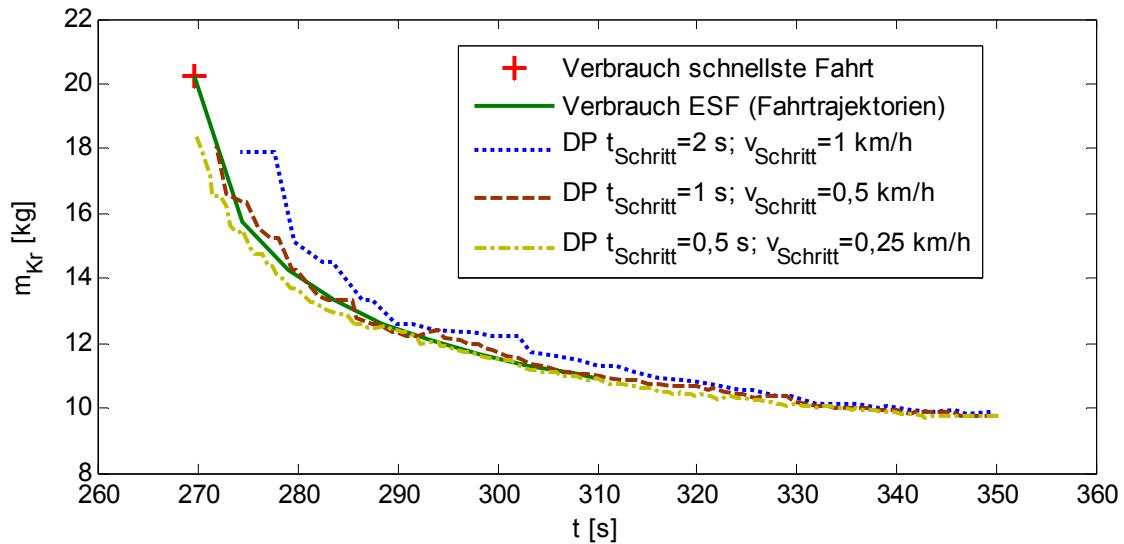


Abbildung C-6: Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Fahrzeit (hügelige Strecke)

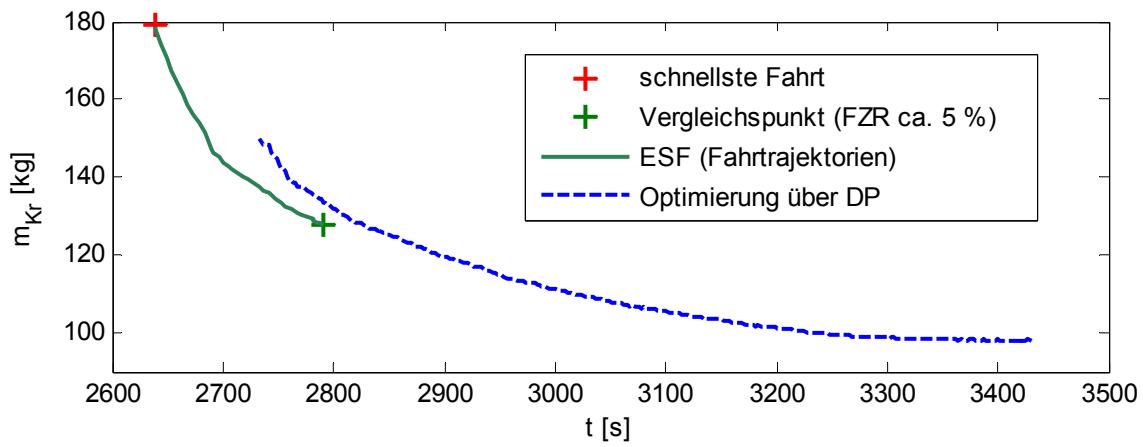


Abbildung C-7: Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Fahrzeitreserve für verschiedene Berechnungsmethoden (ohne Berücksichtigung des Verbrauchs während Haltezeiten)

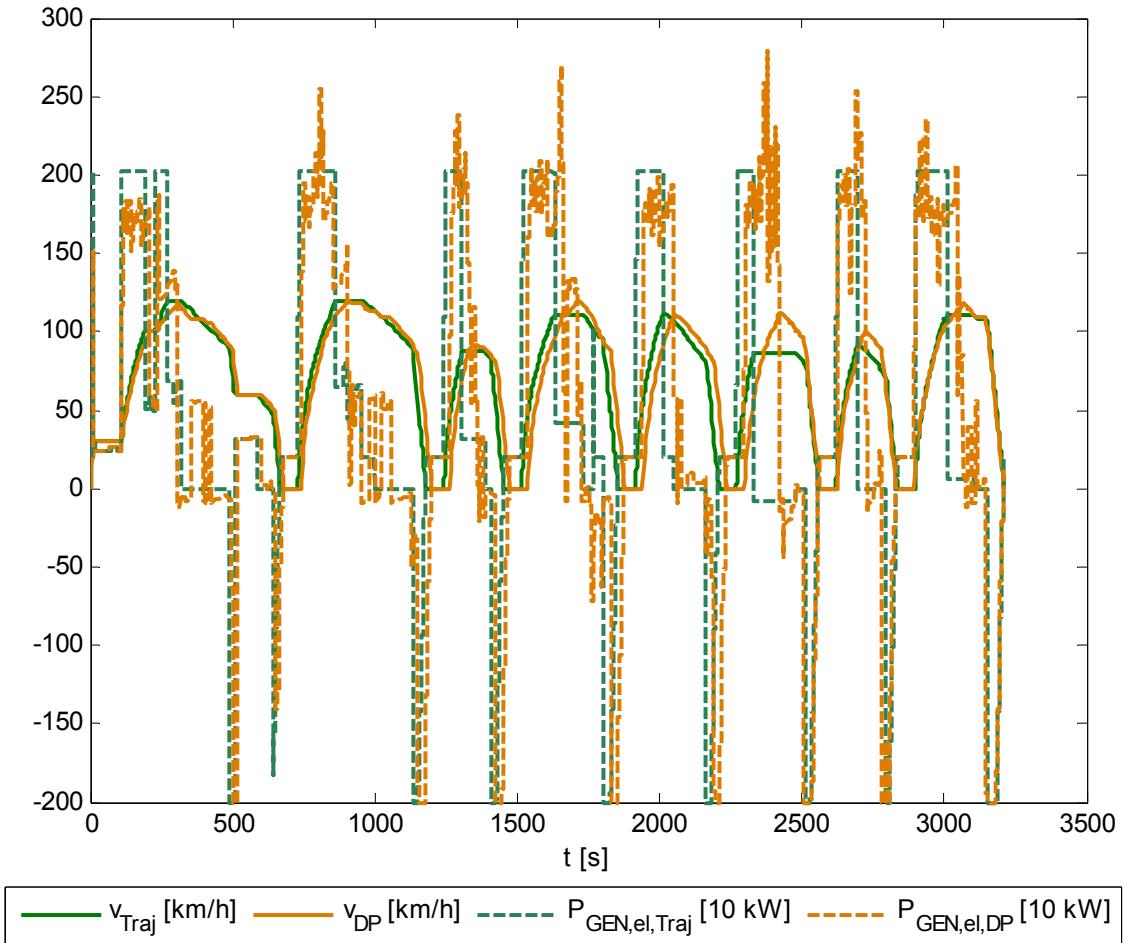


Abbildung C-8: Fahrtrajektorien- und Leistungsbedarf für die energiesparende Fahrweise mit Hilfe der regelbasierten Trajektorienoptimierung und der DP

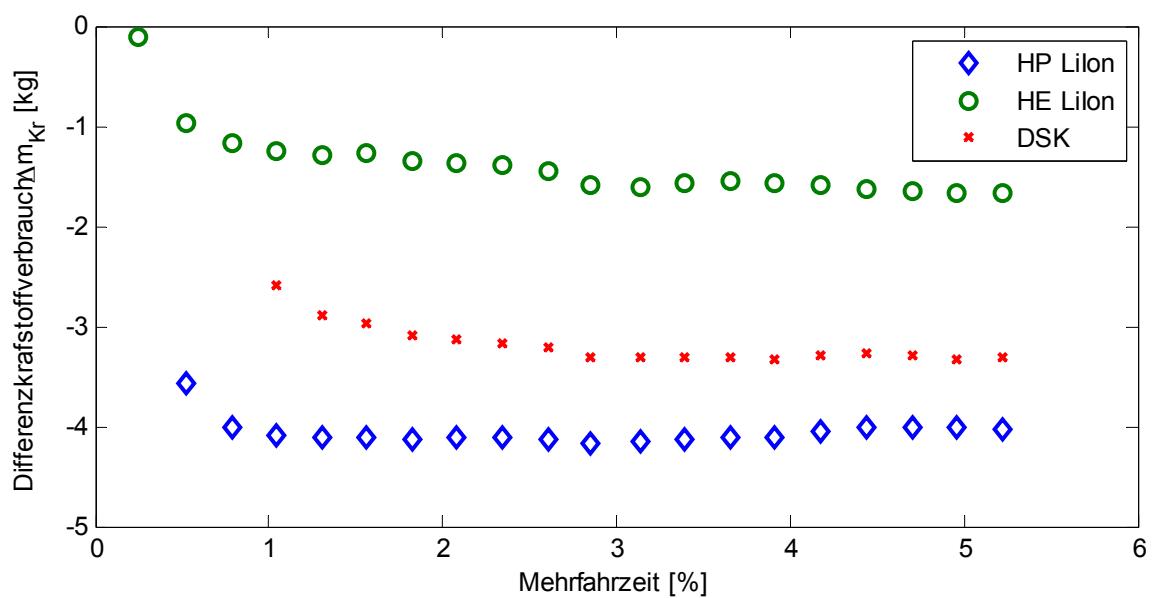


Abbildung C-9: Verbrauchsdifferenz gegenüber der Fahrt ohne Speicher in Abhängigkeit von der Mehrfahrzeit (Speicheroptimierung über DP)

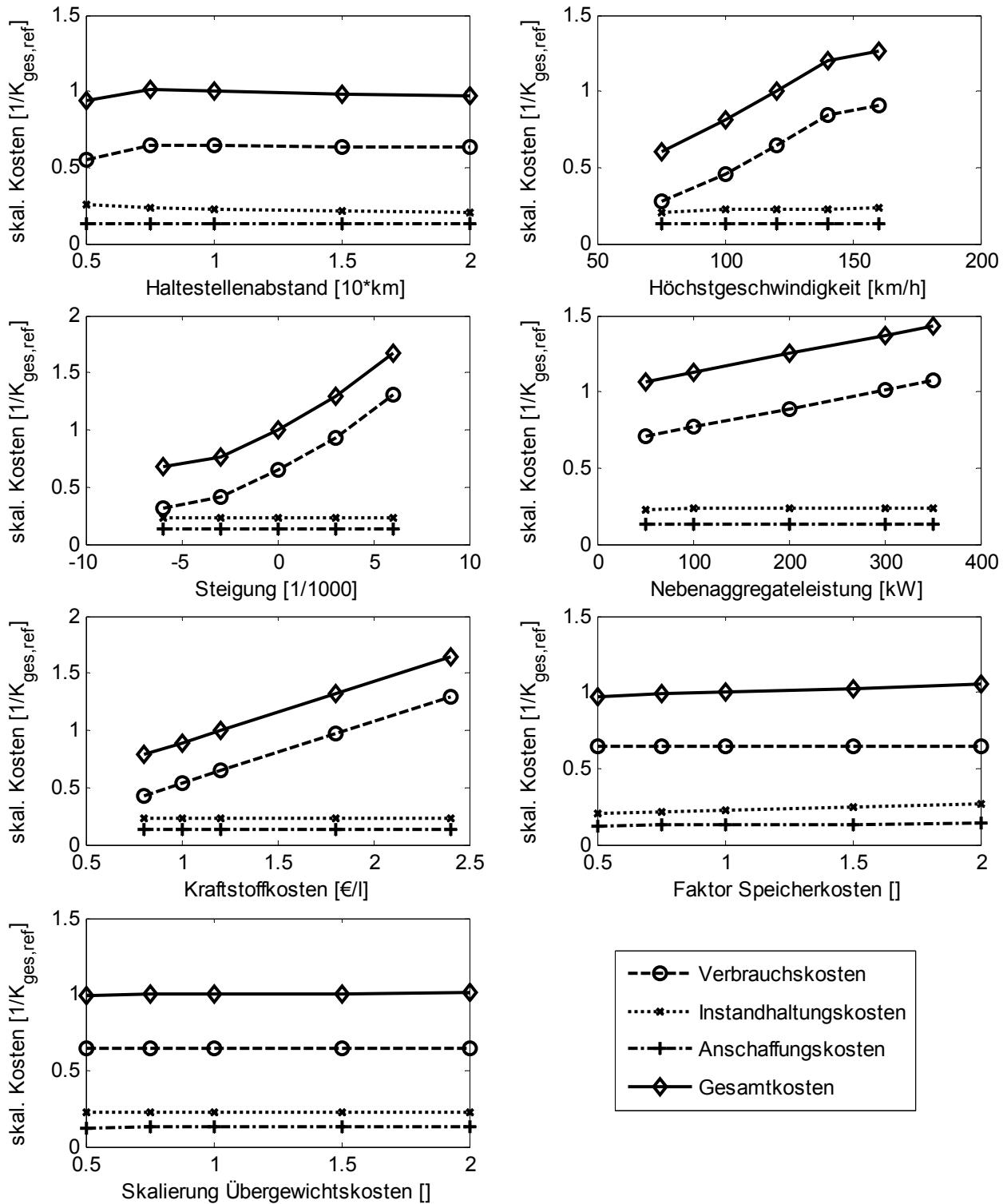


Abbildung C-10: Sensitivitätsanalyse Streckenparameter und ökonomische Randbedingungen

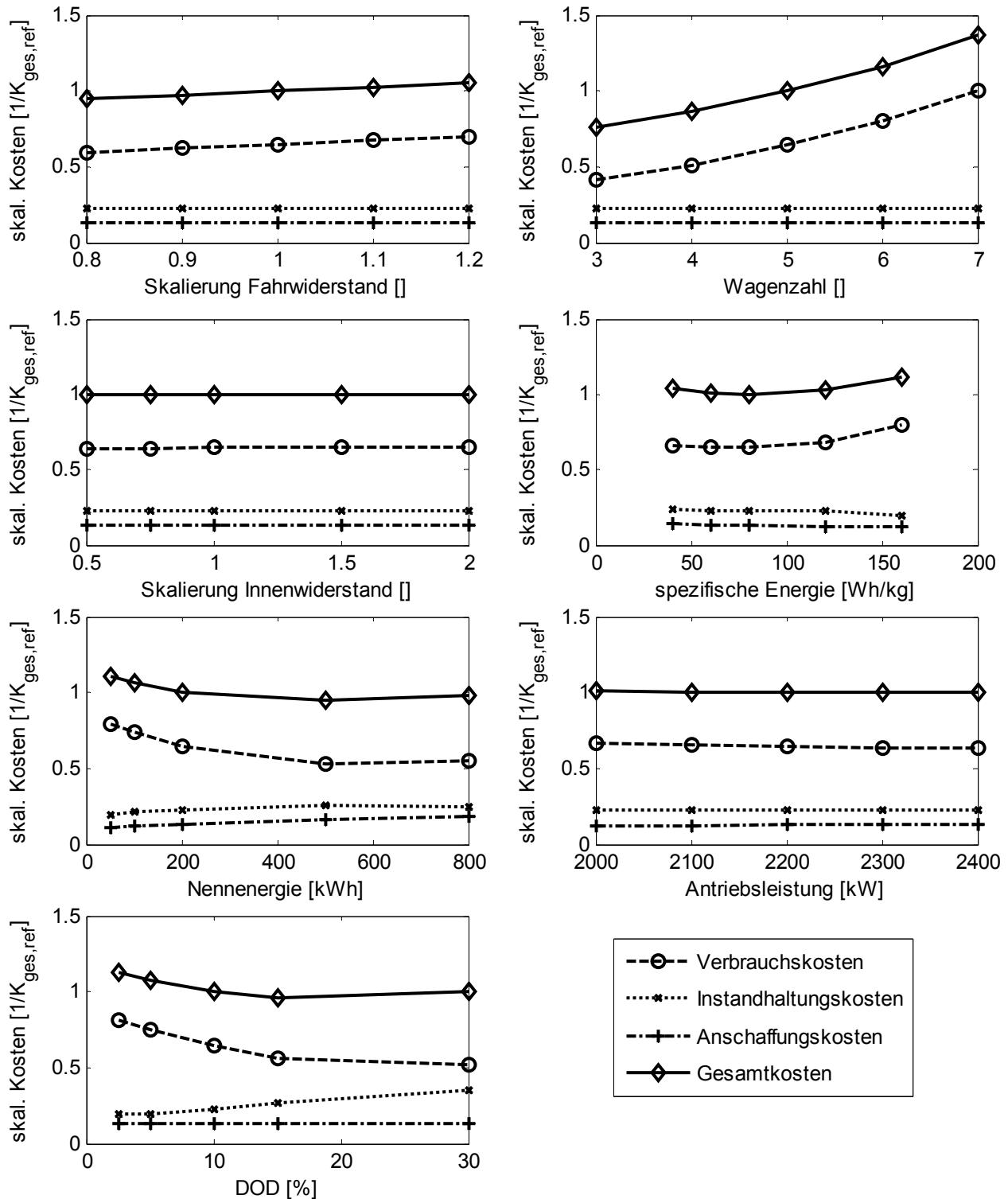


Abbildung C-11: Sensitivitätsanalyse Zugparameter und Speichersteuerung