

Robert Schimke

Optimierung des Betriebsverhaltens und der Konfiguration von
dieselelektrischen Lokomotiven

Beiträge aus der Ingenieurwissenschaften

Robert Schimke

**Optimierung des Betriebsverhaltens und der
Konfiguration von dieselektrischen
Lokomotiven**

 **VOGT**

Dresden 2013

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by the Deutsche Bibliothek
The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie;
detailed bibliographic data is available in the internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2012

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Optimierung des Betriebsverhaltens und der Konfiguration von dieselektrischen
Lokomotiven“ von Robert Schimke überein.

© Jörg Vogt Verlag 2013
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-938860-62-5

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de

Optimierung des Betriebsverhaltens und der Konfiguration von dieselektrischen 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 dieselelektrische 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 dieselelektrischen 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. Beitelshmidt 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. Herauszuheben ist die Begleitung der Arbeit durch Karlheinz Geradts 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 Heghmanns 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 dieselektrische 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 dieselektrischen Lokomotive	16
2.5.1 Erstellung eines Energieflussdiagramms	16
2.5.2 Auswertung und Schlussfolgerungen.....	18
2.6 Energiespeicher für dieselektrische 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 dieselektrische 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	[-]	Strömungswiderstandskoeffizient
d	[m]	Durchmesser
f	[Hz]	Frequenz
f_W	[-]	normalkraftbezogener Fahrwiderstand
g	[m/s ²]	Schwerebeschleunigung
h	[m]	Höhe
h_{rel}	[-]	relative Häufigkeit
i	[A]	elektrischer Strom (Momentanwert)
i_{GET}	[-]	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	[-]	Anzahl (aus Kontext ersichtlich)
p	[-]	normierter Parameter zur Beschreibung von Fahrtrajektorien (siehe S. 101)
r	[m]	Radius
s	[-]	Schlupf (aus Kontext ersichtlich)

s	[m]	Streckenpunkt (aus Kontext ersichtlich)
t	[s]	Zeit
u	[V]	elektrische Spannung (Momentanwert)
v	[m/s]	Geschwindigkeit
z	[-]	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	Hilfsbetriebeumrichter	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
A	Anfang	ist	Istwert
B	Bremsung	kin	kinetisch
Bo	Bogen	korr	korrigiert
E	Ende	l	laden
		max	maximal
		mech	mechanisch

min	minimal
nom	nominell
norm	normiert
opt	optimal
orig	original
pot	potentiell
präd	prädiziert
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]. Dieselebetriebene 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 dieselektrischen Lokomotive für eine vorgegebene Strecke vorgestellt werden. Ziel ist es, die Einführung neuer Funktionen und Systeme zur Energieeinsparung auf den gesamten Kraftstoffverbrauch einer dieselektrischen Lokomotive zu untersuchen. Die dieselektrische 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 dieselektrischen Hafenmobilkranen. 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 Hybridfahrzeuge 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 neuentwickelt. 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 Fahrtafeln und des Energieverbrauchs bei Schienenfahrzeugen ist Stand der Technik. Die in vielen Zugfahrtssimulationsprogrammen verwendeten Zugkraftdiagramme stoßen jedoch bei der Anwendung auf dieselektrische 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 Fahrzeitberechnungen 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 dieselektrische 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 schwankungsbereinigt 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 dieselektrischen 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 Zugsinsatzes 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/Stop-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 Teilaspekten der Simulation und Optimierung des Kraftstoffverbrauchs von die-selektischen Fahrzeugen ist eine Vielzahl von Veröffentlichungen, z. T. aus verwandten Gebie-ten 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 Schienenfahrzeugherstellern oder Ingenieurdienstleistern entwickelt und gepflegt werden. Die meisten Programme sind für die universitäre Forschung nur eingeschränkt verfügbar. Die kostenfreie Verwendung oder gar die Ein-sichtnahme 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 Simu-lation wurde von WÄLTERMANN veröffentlicht, wobei das Hauptaugenmerk auf der Erprobung des Antriebsstrangs mit Hilfe von Hardware-in-the-Loop-Prüfständen liegt [Wäl00]. Serielle Hybrid-fahrzeuge 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 dar-gestellt.

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 (Sitrans 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 Prototy-penfahrzeug 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 Energierekuperation wurde unter anderem mit der Einbindung von Schwungradspeichern in einem dieselektrischen 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 Verstärkung 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 dieselektrischen 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 betriebliche 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 Fahrplanungsassistenten 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 Gesamtfahrzeugbetrachtung 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.

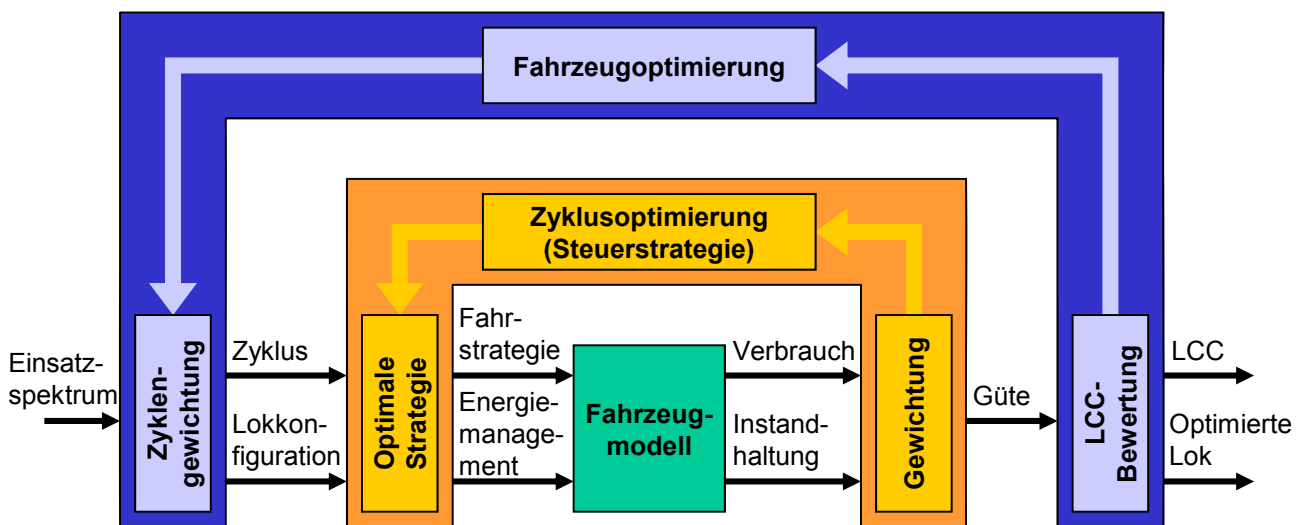


Abbildung 1-1: Schema Optimierungsstrategie

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 Kraftstoffersparnis 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. Beispielfhaft 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 die-selelektrische 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 Dieselmotorgeneratorsätze (Start/Stop-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 einschätzen 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 ange-regt.