



UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

**FAKULTÄT FÜR
ELEKTROTECHNIK,
INFORMATIK UND
MATHEMATIK**

Selbstoptimierende Betriebsstrategien für ein hybrides Energiespeichersystem aus Batterien und Doppelschichtkondensatoren

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik
der Universität Paderborn

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Christoph Romaus

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker

Zweiter Gutachter: Univ.-Prof. Dr. ir. Dr. h. c. Rik W. De Doncker

Tag der mündlichen Prüfung: 07.02.2013

Paderborn 2013

Diss. EIM-E/232

Berichte aus dem Fachgebiet Leistungselektronik und
Elektrische Antriebstechnik

Band 3

Christoph Romaus

**Selbstopimierende Betriebsstrategien für ein
hybrides Energiespeichersystem aus Batterien
und Doppelschichtkondensatoren**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2013

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2065-6

ISSN 1862-3492

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik der Universität Paderborn im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“.

Ich möchte an dieser Stelle den zahlreichen Menschen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Nennen möchte ich zunächst Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker, den Leiter des Fachgebiets, der es mir ermöglicht hat, diese Arbeit anzufertigen und der sie betreut und begutachtet hat. Auch Herrn Univ.-Prof. Dr. ir. Dr. h. c. Rik W. De Doncker danke ich für die Übernahme des Koreferats und das der Arbeit entgegengebrachte Interesse.

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit im Sonderforschungsbereich mit den Kollegen aus den Bereichen Mathematik, Informatik, Elektrotechnik und Maschinenbau hat diese Arbeit durch den kreativen Gedankenaustausch bereichert. Insbesondere danke ich Frau Dr. Katrin Witting vom Lehrstuhl für Angewandte Mathematik der Universität Paderborn für die Unterstützung bei der bildraumorientierten Optimierung der Betriebsstrategien und die fruchtbaren Diskussionen über Optimierungsprobleme, sowie den Kollegen Dipl.-Ing. Bernd Schulz und Dr.-Ing. Tobias Knoke des eigenen Fachgebiets für den fachlichen Austausch zur Selbstoptimierung und Dynamischen Programmierung.

Meinen Fachgebietskollegen danke ich für die gute Zusammenarbeit, die stete Hilfsbereitschaft, das hervorragende Arbeitsklima und die aufmunternden Mittagspausen. Besonderer Dank gilt den Herren Dipl.-Ing. Karl Stephan Stille und Dipl.-Ing. Christoph Schulte für die zahlreichen Anregungen und Verbesserungsvorschläge zu dieser Arbeit, den Herren Dipl.-Ing. Tobias Schneider und Dr.-Ing. Christian Henke für die Aufzeichnung stochastischer Fahrspiele, sowie Herrn Norbert Sielemann für die Unterstützung beim Aufbau des Prüfstands und Umrichters.

Ferner gilt ein herzliches Dankeschön allen beteiligten Studenten, die mich bei der Umsetzung der Ideen, vom Prüfstand bis zur Implementierung der entwickelten Verfahren, unterstützt haben und damit einen wertvollen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Der größte Dank gilt meinen Eltern, die mich auf meinem Weg und bei meinen Entscheidungen stets unterstützt haben, sowie meiner Freundin Simone, die mir in der Schlussphase dieser Dissertation den Rücken gestärkt hat. Sie haben somit maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen.

Christoph Romaus
Paderborn, im April 2013

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	VII
Kurzfassung, Abstract	XV
1 Einleitung	1
2 Energiespeicher	5
2.1 Charakterisierung von Energiespeichern für Traktionsanwendungen	6
2.2 Elektrochemische Energiespeicher	7
2.2.1 Blei-Säure-Batterien	8
2.2.2 Nickel-Cadmium-Batterien	9
2.2.3 Nickel-Metallhydrid-Batterien	10
2.2.4 Li-Ionen-Batterien	12
2.2.5 Hochtemperaturbatterien – NaNiCl ₂ -(ZEBRA)- und NaS-Batterien	14
2.3 Elektrische Energiespeicher	15
2.3.1 Doppelschichtkondensatoren	15
2.3.2 Supraleitende magnetische Energiespeicher	16
2.4 Mechanische Energiespeicher – Schwungradspeicher	17
2.5 Fazit Speichertechnologien	18
3 Hybrides Energiespeichersystem	21
3.1 Struktur des hybriden Energiespeichersystems	22
3.1.1 Passive Parallelschaltung	23
3.1.2 Aktive Parallelschaltung mittels Gleichstromsteller	25
3.2 Bewertung der Strukturen	29
3.3 Umrichtertopologie des bidirektionalen Gleichstromstellers	32
3.4 Struktur- und Energiespeicherauswahl	33
3.5 Kostenabschätzung	34
4 Modellbildung des hybriden Energiespeichersystems	37
4.1 Modellbildung der Nickel-Metallhydrid-Batterie	38
4.1.1 Klemmenspannungsmodell	39
4.1.2 Ladegradmodell	40
4.1.3 Verlustmodell und thermisches Modell	42
4.1.4 Lebensdauermodell	43

4.2	Modellbildung des Doppelschichtkondensators	45
4.2.1	Klemmenspannungs- und Ladegradmodell	45
4.2.2	Verlustmodell und thermisches Modell	48
4.2.3	Lebensdauermodell	48
4.3	Modellbildung des bidirektionalen Gleichstromstellers	50
4.4	Gesamtmodell	51
5	Optimierungspotenzial des hybriden Energiespeichersystems	53
5.1	Bemessung der Speicherkomponenten	53
5.1.1	Heuristische Bemessung	54
5.1.2	Modellbasierte und optimale Bemessung	55
5.2	Betriebsstrategien	56
5.2.1	Klassifizierung	56
5.2.2	Optimale Betriebsstrategien	56
5.2.3	Suboptimale Betriebsstrategien	57
5.2.4	Heuristische Betriebsstrategien	58
5.3	Optimierungsproblem	59
5.4	Optimierungsverfahren	61
5.5	Selbstoptimierung	62
6	Betriebsstrategie für Fahrzeuge mit langem Planungshorizont und wiederkehrenden Fahrprofilen (Schienenfahrzeuge)	65
6.1	Forschungsprojekt RailCab – Neue Bahntechnik Paderborn (NBP)	66
6.2	Energieversorgung der RailCab-Fahrzeuge	67
6.3	Bemessung des Energiespeichersystems	68
6.3.1	Bemessung des hybriden Energiespeichersystems	69
6.3.2	Vergleich mit einem reinen Batteriespeicher	69
6.3.3	Skaliertes hybrides Energiespeichersystem	70
6.4	Konzept zur Prädiktion des zukünftigen Leistungsbedarfs	72
6.4.1	Betriebsstruktur des RailCabs	72
6.4.2	Vorausschauende Planung des zukünftigen Leistungsbedarfs unter Unsicherheiten	72
6.5	Mehrzioptimierung der Leistungsaufteilung auf die Speicher des hybriden Energiespeichersystems	74
6.5.1	Pareto-Optimalität	74
6.5.2	Konkretisierung des Optimierungsproblems	75
6.5.3	Bildraumorientierte Verfahren zur Offline-Approximation einer paretooptimalen Lösung	77
6.5.4	Echtzeitfähige Abschätzung einer suboptimalen Betriebsstrategie mittels Heuristischer Suche	78
6.5.5	Ergebnisse der bildraumorientierten Verfahren (Pareto-Optimierung)	80

6.5.6	Ergebnisse der suboptimalen Betriebsstrategie (Heuristische Suche)	87
6.6	Selbstoptimierende Betriebsstrategie	90
6.6.1	Selbstoptimierungsprozess und „Decision Making“	90
6.6.2	Potenziale der Selbstoptimierung unter veränderlichen Umfeldbedingungen	92
6.7	Implementierung am Prüfstand	96
6.7.1	Regelung des Prüfstands	97
6.7.2	Strukturierte Informationsverarbeitung – Operator-Controller-Modul	98
6.7.3	Validierung	105
6.8	Fazit	107
7	Betriebsstrategie für Fahrzeuge mit kurzem Planungshorizont (Straßenfahrzeuge)	109
7.1	Anwendungsbeispiel: Elektrostraßenfahrzeug mit hybridem Energiespeichersystem	110
7.2	Modellbildung des Fahrzeugs	111
7.2.1	Längsdynamik	111
7.2.2	Antriebsstrang	114
7.2.3	Hybrides Energiespeichersystem	116
7.3	Fahrspiele	117
7.4	Optimale Bemessung und optimale Betriebsstrategie auf Basis der Deterministischen Dynamischen Programmierung	122
7.4.1	Algorithmus der Deterministischen Dynamischen Programmierung	122
7.4.2	Anwendung auf das hybride Energiespeichersystem	124
7.4.3	Optimale Bemessung der Speichergröße (verlustoptimal)	127
7.4.4	Fazit Bemessung	134
7.5	Suboptimale, kausale Betriebsstrategie auf Basis der Stochastischen Dynamischen Programmierung	138
7.5.1	Stochastische Beschreibung der Fahrspiele als homogene Markov-Kette erster Ordnung	138
7.5.2	Algorithmus der Stochastischen Dynamischen Programmierung	140
7.5.3	Implementierung	143
7.5.4	Ergebnisse	144
7.5.5	Fazit zur suboptimalen, kausalen Betriebsstrategie	153
7.6	Selbstoptimierende Strategie	154
7.6.1	Erweiterung des Algorithmus der Stochastischen Dynamischen Optimierung zur Mehrzieloptimierung	155
7.6.2	Übereinstimmung des gefahrenen Fahrspiels mit den Trainingsdaten	159
7.6.3	Strategieauswahl und Zielgewichtsbestimmung	162
7.6.4	Simulative Validierung	164
7.6.5	Fazit zur selbstoptimierenden Betriebsstrategie	170

7.7	Fazit	171
8	Zusammenfassung	173
A	Anhang	177
A.1	Daten der verwendeten Energiespeicher	177
A.1.1	Im Detail betrachtete Energiespeicher des hybriden Energiespeichersystems	177
A.1.2	Weitere Energiespeicher für den Technologie- und Kostenvergleich	178
A.2	Ergänzungen zu Kapitel 6 (Betriebsstrategien für Fahrzeuge mit langem Planungshorizont)	179
A.2.1	Kennwerte der Leistungsprofile	179
A.2.2	Berücksichtigung von Nebenbedingungen mittels Bestrafungsfunktion	179
A.2.3	Ladegraderhaltung im Kurzzeitspeicher	181
A.2.4	Zusätzliche Ergebnisse der bildraumorientierten Optimierung	181
A.2.5	Zusätzliche Ergebnisse der Heuristischen Suche	183
A.3	Ergänzungen zum Kapitel 7 (Betriebsstrategien für Fahrzeuge mit kurzem Planungshorizont)	187
A.3.1	Daten des Fahrzeugs	187
A.3.2	Fahrprofile	188
A.3.3	Zusätzliche Ergebnisse der Stochastischen Dynamischen Programmierung	195
	Abbildungsverzeichnis	199
	Tabellenverzeichnis	205
	Literaturverzeichnis	207
	Verzeichnis der eigenen wissenschaftlichen Publikationen	218
	Verzeichnis der betreuten studentischen Arbeiten	221
	Index	223

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

Bat.	Batterie
C, C-Rate	auf einstündigen Entladestrom bezogene Stromstärke
D	Differenzial
DDP	Deterministische Dynamische Programmierung
DLC	Doppelschichtkondensator (<i>engl.</i> double layer capacitor)
DOD	Entladegrad (<i>engl.</i> depth of discharge)
DSP	Digitaler Signalprozessor
ECMS	Equivalent-Consumption Minimization Strategies
EZO	Einzielloptimierung
FS	Fahrspiel
G	Getriebe
GPS	Global Positioning System
HES	hybrides Energiespeichersystem
HEV	hybrid-elektrisches Fahrzeug
Kfz	Kraftfahrzeug
Li-Ion	Lithium-Ionen
M	elektrischer Motor
MOP	Mehrzieloptimierungsproblem
MZO	Mehrzieloptimierung
NaNiCl ₂	Natrium-Nickelchlorid
NaS	Natrium-Schwefel
NBP	Neue Bahntechnik Paderborn
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NT	Netzteil
OCM	Operator-Controller-Modul
PWM	Pulsweitenmodulation
S.o.	Selbstopoptimierung
SDP	Stochastische Dynamische Programmierung

SDP _{<i>x</i>}	Strategie berechnet mittels SDP auf Basis von <i>x</i> Fahrspielen
SFB 614	Sonderforschungsbereich 614: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus
SG	Schädigungsgrad
SMES	supraleitender magnetischer Energiespeicher
SOC	Ladegrad (<i>engl.</i> state of charge)
SOH	Alterung (<i>engl.</i> state of health)
UDP	User Datagram Protocol (verbindungsloses Netzwerkprotokoll)
UR	leistungselektronischer Umrichter
ZEBRA	Zeolite Battery Research Africa Project

Formelzeichen

Definitionen und Schreibweisen

I, U	konstante Größen
i, u	zeitlich veränderliche Größen
i_k, u_k, t_k	zeitdiskrete Größen
i^*, u^*	Sollwertvorgaben
$\bar{I}, \bar{U}, P_{\text{avg}}$	Mittelwerte
$ x $	Absolutwert
$i_{\text{eff}}, u_{\text{eff}}$	Effektivwerte
i_N, u_N	Nenngrößen
x_{Bat}	batteriebezogene Größen
x_{DLC}	DLC-bezogene Größen
x_{HES}	auf das hybride Energiespeichersystem bezogene Größen
x_{F}	fahrzeugbezogene Größen
x_{R}	radbezogene Größen
\leq_p	komponentenweise kleiner/gleich (def. für Vektoren)

Formelzeichen und Symbole

A	Ähnlichkeitsindex
A_{Bat}	effektive Oberfläche der Batterie
A_{F}	wirksame Querschnittsfläche des Fahrzeugs
C	Kapazität
C_0	konstanter Anteil der Kapazität des DLC
C_{E}	Doppelschichtkapazität der Batterie
$\kappa_{\text{K,Bat}}$	Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion
$\hat{C}_{\text{N,DLC}}$	Nennkapazität des DLC

c_p	Peukert-Koeffizient
c_r	Rollwiderstandsbeiwert
$c_{S, \text{Bat}}$	Wärmeübergangskoeffizient für Strahlung
$c_{th, \text{Bat/DLC}}$	Wärmekapazität des Batteriepacks/des DLC
$C_V(u_{0, \text{DLC}})$	spannungsabhängiger Anteil der Kapazität des DLC
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
C_{ZK}	Zwischenkreiskapazität
d	Diskretisierungsfehler
D	Diode
DOD	Zyklustiefe
E	Energie
E_A	Energiebedarf für den Antrieb des RailCabs
E_{Bedarf}	(Netto-) Energiebedarf
E_{chopper}	nicht nutzbare Energie, über Bremswiderstand dissipiert
$\Delta E_{\text{DLC, min}}$	minimale Energiereserve
$E_{\text{Durchsatz}}$	Energiedurchsatz
ΔE_{ES}	Energiedifferenz im Speicher nach Fahrzyklus
E_{kin}	kinetische Energie
E_{Nutz}	genutzte Energie
E_{Ssys}	Gesamtenergie im kinetisch-elektrischen System
$E_{\hat{U}}$	über den Linearmotor übertragbare Energie
E_V	Gesamtverluste
E'_V	normierte Zielfunktion E_V
$E_{V \text{ Norm}}$	Verluste des Referenzspeichers
E_ω	Erwartungswert der Gesamtkosten
f_1, f_2	Zielfunktionen
$F(x)$	Vektor der Zielfunktionen
f_B	Bestrafungsfunktion
$F_{gF}, F_{gR}, F_{g\Sigma}$...	in Fahrtrichtung wirksamen Anteile der Gewichtskraft (Fahrzeug, Räder, gesamt)
F_1	Luftwiderstandskraft (aerodynamische Widerstandskraft)
F_r	Rollwiderstandskraft
F_w	Gesamtwiderstandskraft
F_x	Traktionskraft
F_{xR}	Reaktionskraft zwischen Rad und Karosserie
F_y	senkrecht zur Straße wirksame Gewichtskraft
g	Gewichtungsfaktor bzw. Gravitationsfeldstärke/Erdbeschleunigung

G	Kostenmatrix
g_k	Kosten
$i_{\text{Bat/DLC}}$	Klemmenstrom der Batterie/des DLC
$I_{\text{G0,Bat}}$	Selbstentladestrom der Batterie bei Nennbedingungen
$i_{\text{G,Bat}}$	Gasungsstrom der Batterie
i_{HES}	Klemmenstrom des hybriden Energiespeichersystems
j	Übersetzungsverhältnis von Getriebe und Differenzial
J_π	Gesamtkosten
J_{R}	Summenträgheitsmoment der Räder und rotierenden Massen
k	Zählvariable
K_{A}	Komplexität des Suchbaums
$k_{\text{G}\theta, \text{Bat}}$	temperaturbezogener Gasungsfaktor
$k_{\text{GU, Bat}}$	spannungsbezogener Gasungsfaktor
$k_{\text{LD, Bat}}$	zyklentiefeabhängiger Lebensdauerbeiwert
$k_{\text{R, DLC}}$	temperaturabhängiger Widerstandsbeiwert des DLC
l	Länge des gleitenden Horizonts zur Ähnlichkeitsbestimmung
L	Induktivität
$LD_{0, \text{DLC}}$	Lebensdauer des DLC bei Nennbedingungen
$m_{\text{F}}, m_{\text{R}}, m_{\Sigma}$	Massen der Karosserie, der Räder und des Gesamtfahrzeugs
n_{LP}	Anzahl der Lösungen im MOP
p, P	Leistung
p'	auf die Zwischenkreisleistung umgerechnete Speicherleistung
p^*	Sollvorgabe der Leistung
P_{A}	Antriebsleistung des Linearmotors
$p_{\text{A, Bat/DLC}}$	Wärmeabgabe der Batterie/des DLC
p_{BN}	Bordnetzleistung
P_{el}	elektrische Gesamtleistung
p_{HES}	Leistung des hybriden Energiespeichersystems
p_{Last}	Leistung der elektrischen Last
p_{mech}	mechanische Leistung
p_{NT}	Netzteilleistung
P_{res}	Leistungsreserve
p_{Sp}	Leistung des Energiespeichers
p_{Treib}	Treibarbeit
p_{U}	Leistung zur direkten Umladung zwischen Batterie und DLC
P_{U}	über den Linearmotor übertragbare Leistung

p_V	Verlustleistung
$p_{VG, \text{Bat}}$	Gasungsverluste der Batterie
$p_{VR, \text{Bat}}$	ohmsche Verluste der Batterie
$p_{V, \text{UR}}$	Umrichterverluste
p_{ZK}	Zwischenkreisleistung
$\mathbb{P}(x_{k+1} x_k)$	bedingte Übergangswahrscheinlichkeit
q	Ladung
Q_0	Anfangsladung
Q'_N	maximal nutzbare Ladung der Batterie (auch: tatsächliche Kapazität)
r	Radius
R_E	Ersatzwiderstand der Durchtrittsreaktion (Batterie) bzw. Selbstentladung (DLC)
$R_{i, \text{Bat/DLC}}$	Innenwiderstand der Bat/des DLC
R_L	ohmscher Widerstand der Induktivität
\mathbb{R}^n	n-dimensionaler Raum der reellen Zahlen
$R_{\text{SOC, Bat}}$	ladegradabhängiger Innenwiderstand der Batterie
$R_{\text{th, DLC}}$	thermischer Übergangswiderstand des DLC
s	Schaltsignal für den Leistungsumrichter
S	Schalter, Transistor
S	zulässiger Wertebereich des Optimierungsproblems
SG	Schädigungsgrad
$s_{j,k}$	k -ter Folgeknoten des Suchbaums zur Zeit j
SOC	Ladegrad (<i>engl.</i> state of charge)
ΔSOC	mittlere Abweichung des Ladegrads vom ausgeglichenen Ladegrad
$SOC_{\text{DLC, ziel}}$	Zielladegrad des DLC beim Elektrofahrzeug
SOC_{max}	maximaler Ladegrad
SOC_{med}	ausgeglichener Ladegrad des DLC
SOC_{min}	minimaler Ladegrad
t	Zeit
T	Betrachtungszeitraum, Streckenabschnittsdauer
T_E	Entladezeit
T_L	Zeitkonstante der Induktivität
$T_{\text{mess, i/u}}$	Zeitkonstante der Messwerterfassung und Abtastung
T_N	Nachstellzeit des Reglers oder Vorfilters
T_{SR}	statistische Stromrichtertotzeit
T_Σ	Summenzeitkonstante
T_M	Drehmoment der elektrischen Maschine

T_a	Antriebsdrehmoment
T_r	Drehmoment am Radaufstandspunkt
$u_{0, \text{Bat}}$	Ruhe-spannung der Batterie
$u_{0, \text{DLC}}$	Leerlaufspannung/innere Spannung des Doppelschichtkondensators
$U_{0, \text{min}, \text{Bat}}$	Entladeschlussspannung
$u_{\text{Bat}/\text{DLC}}$	Klemmenspannung der Batterie/des DLC
u_{HES}	Klemmenspannung des hybriden Energiespeichersystems
u_k	Entscheidungsvariable
U_k	Menge aller Entscheidungsvariablen
$u_{\text{Sp}}, i_{\text{Sp}}$	Klemmengrößen des Energiespeichers
u_{ZK}	Zwischenkreisspannung
v	Geschwindigkeit
V	Verbraucher (elektrisch, mechanisch)
V_R	Verstärkung des Reglers
$W_{\text{A, Fehler}}$	nicht erfüllbare Antriebsarbeit
W_{Chop}	nicht rekuperierbare Antriebsarbeit
$W_{\text{Fahrspiel}}$	verrichtete Arbeit auf dem Fahrspiel abzüglich Rekuperation
$w_{j,k}$	Bewertungszahl im Suchbaum zum k -ten Zweig zur Zeit j
$W_{\text{Rück}}$	verrichtete Arbeit beim Rekuperieren
x, x^*	Optimierungsvariable
x_0	Anfangszustand
x_k	Zustandsvariable
X_k	Menge aller Zustandsvariablen, Zustandsraum
X'	erweiterter Zustandsraum
Z_{Bat}	Zyklenzahl
$Z_{\text{DOD}, \text{Bat}}$	zyklentiefeabhängige Zyklenzahl
Z_{ext}	externe Zielvorgaben
α	Gewichtungsfaktor zur Ladegraderhaltung in der SDP
α_a	Normierungsfaktor zur Ähnlichkeitsbestimmung
$\alpha_{\text{C}, \text{DLC}}$	Temperaturkoeffizient der DLC-Kapazität
$\alpha_{\text{Q}, \text{Bat}}$	Temperaturkoeffizient der entnehmbaren Ladung
α_R	Temperaturkoeffizient des Innenwiderstands
β	Gewichtungsfaktor zur Zielfunktion f_2 (Elektrofahrzeug)
γ	Steigungswinkel des Streckenabschnitts
γ_{Bat}	ladegradabhängiger Exponentialbeiwert des Innenwiderstands
ε	Schranke der Abbruchbedingung

η	Wirkungsgrad
η_A	Systemwirkungsgrad Umrichter/Elektromotor
η_{kin}	Anteil der im DLC gespeicherten Leistung bei Rekuperation
η_{UR}	Wirkungsgrad des Umrichters
$\vartheta_{0, \text{Bat/DLC}}$	Anfangswert der Batterietemperatur/DLC-Temperatur
ϑ_{Bat}	Temperatur der Batterie
ϑ_{DLC}	Temperatur des DLC
ϑ_{N}	Bezugstemperatur für die Energiespeicherparameter ($\vartheta_{\text{N}} = 25^\circ\text{C}$)
ϑ_{U}	Umgebungstemperatur
λ	Diskontfaktor
μ_i	Entscheidung
π	Entscheidungsfolge, Strategie
π^o	optimale Entscheidungsfolge
Π	Menge der zulässigen Entscheidungsfolgen
ϱ_l	spezifische Dichte der Luft
ω	Wahrscheinlichkeitsverteilung des stochastischen Prozesses
ω	Winkelgeschwindigkeit der Fahrzeugräder
ω_{M}	Drehzahl der elektrischen Maschine

Kurzfassung

Elektro- und Hybridfahrzeuge stellen hohe Anforderungen an die Spitzenleistung, Reichweite und Effizienz der Energiespeichertechnik. Ein hybrides Energiespeichersystem, welches die hohe Energiedichte von Batterien mit der hohen Leistungsdichte und Zyklfestigkeit von Doppelschichtkondensatoren kombiniert, erfüllt diese Anforderungen ausgezeichnet.

Durch die Hybridisierung ergeben sich Freiheitsgrade und somit Optimierungspotenziale hinsichtlich der Systemstruktur, der Bemessung der Komponenten und insbesondere des Entwurfs von Betriebsstrategien für die Leistungsaufteilung auf die beiden Energiespeicher. Anhand der Anwendungsbeispiele des autonomen Schienenverkehrssystems *RailCab* und eines Elektrostraßenfahrzeugs werden Methoden zur Nutzung dieser Freiheitsgrade vorgestellt und bewertet.

Die Struktur des hybriden Energiespeichersystems wird über einen technischen Vergleich verschiedener Alternativen festgelegt. Eine parallele Anbindung beider Speicher an das Bordnetz über einen eigenen Leistungssteller stellt die vorteilhafteste Variante für die betrachteten Anwendungen dar.

Die Bemessung der Komponenten erfolgt für das RailCab heuristisch, für das Elektrofahrzeug über eine Parameterstudie diskreter Speicherauslegungen und die Berechnung optimaler Strategien anhand typischer Fahrspiele. In beiden Fällen kann das Gewicht des Energiespeichers durch Hybridisierung um mindestens 30 % reduziert und gleichzeitig die Leistungsdichte signifikant um 70–230 % gesteigert werden.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Entwicklung intelligenter Betriebsstrategien auf Basis mathematischer Optimierungsverfahren. Dabei werden zwei gegenläufige Zielfunktionen berücksichtigt. Es werden optimale und stochastische Ansätze untersucht.

Mit dem im Sonderforschungsbereich 614 entwickelten Konzept der Selbstoptimierung werden selbstoptimierende Betriebsstrategien entworfen, die sich dadurch auszeichnen, dass sie ihr Zielsystem selbsttätig zur Laufzeit an variable Umfeld- und Systembedingungen anpassen. Durch die flexible Auswahl der in der jeweiligen Situation relevanten Zielausprägung wird eine Ergebnisqualität erreicht, die deutlich über die Qualität klassischer Strategien mit statischem Zielsystem hinausgeht. Dies wird anhand von Anwendungsbeispielen gezeigt, bei denen zum einen durch Aufbau einer Reserve für Spitzenleistung unvorhergesehene bzw. kritische Fahrsituationen sicher bewältigt werden, während auf unkritischen Fahrprofilen eine hohe Effizienz und eine Verlustreduktion von bis zu 40 % gegenüber einem reinen Batteriesystem erzielt werden.

Abstract

Electric and hybrid-electric vehicles place high demands for peak power, energy content and efficiency on energy storage technology. A hybrid energy storage system combining the high specific energy of batteries and the high specific power and cycle stability of double layer capacitors excellently meets these demands.

With two independent energy storage components, degrees of freedom and thus potential for optimization arise with regard to the system structure, the sizing of the components and particularly the design of energy management strategies for the distribution of power to both storages. The development of appropriate methods is demonstrated and rated by the examples of the autonomously operated railway system *RailCab* and an electric car.

The structure of the hybrid energy storage system is determined by technical comparison of several alternatives. For the considered applications, a parallel connection of both storages by separate power converters is particularly advantageous.

Dimensioning of the components is carried out heuristically for the *RailCab* and by a parametric study of discrete storage sizes for the electric car, using optimal strategies and typical driving cycles. In both cases, by hybridization the weight of the storage can be reduced by at least 30 % and simultaneously the specific power can be increased significantly by 70–230 %.

The main focus of this thesis is on the development of intelligent energy management strategies based on mathematical optimization methods. Two competing objective functions are considered. Optimal and stochastic approaches are investigated.

Applying the concept of self-optimization developed in Collaborative Research Center 614, self-optimization energy management strategies are composed which are characterized by the ability to adapt their system of objectives to continuously varying surroundings and system conditions during runtime. By flexible rating of the objectives relevant to the respective situation, the quality of results is distinctly enhanced compared to classic strategies with static system of objectives. This is demonstrated using the application examples: By establishing a power reserve, unexpected or critical driving situations can be safely handled, while on uncritical driving profiles a high efficiency and a loss reduction up to 40 % compared to a pure battery can be achieved.