

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	V
Kurzfassung.....	VII
Abstract.....	IX
Inhaltsverzeichnis	XI
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	XV
1 Einleitung.....	1
2 Methodik zur Auswahl von (kombinierten) Energiespeichersystemen für Fahrzeugantriebe	5
3 Energiespeicher für Traktionsanwendungen	9
3.1 Treiber für den Einsatz von Energiespeichern	9
3.2 Übersicht Energiespeicher für Traktionsanwendungen.....	12
3.2.1 Bleibatterien (Pb).....	15
3.2.2 Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH).....	16
3.2.3 Natrium-Nickel-Chlorid-Batterien (NaNiCl)	16
3.2.4 Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ion)	17
3.2.5 Elektrochemische Doppelschichtkondensatoren (Supercaps).....	18
3.2.6 Vergleich gängiger elektrochemischer Energiespeicher	18
3.2.7 Vergleich Lithium-Ionen-Technologien	20
3.3 Anforderungen an Energiespeicher in mobilen Anwendungen	22
3.4 Einsatz von Energiespeichern in Schienenfahrzeugen	24
3.5 Auswahl geeigneter Energiespeichertechnologien für Schienenfahrzeuganwendungen	27
4 Modellierung der Energiespeicher	31
4.1 Lithium-Ionen-Batterien.....	32
4.1.1 Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Batterie	32
4.1.2 Alterungsmechanismen von Lithium-Ionen-Batterien	33

4.1.3	Modellierung der Alterung (Lithium-Ionen-Batterie).....	37
4.1.4	Modellierung der Energieverluste (Lithium-Ionen-Batterie).....	43
4.2	Elektrochemische Doppelschichtkondensatoren(Supercaps)	46
4.2.1	Aufbau und Funktion von elektrochemischen Doppelschichtkondensatoren.....	47
4.2.2	Alterungsmechanismen von elektrochemischen Doppelschichtkondensatoren.....	49
4.2.3	Modellierung der Alterung (Supercap).....	50
4.2.4	Modellierung der Energieverluste (Supercap).....	52
5	Kombinierte Energiespeichersysteme.....	55
5.1	Potentiale kombinierter Energiespeichersysteme.....	55
5.2	Elektrische Integration kombinierter Energiespeichersysteme.....	56
5.3	Betriebsstrategien und Dimensionierung kombinierter Energiespeichersysteme	59
6	Optimierungsverfahren.....	61
6.1	Grundlagen zu Optimierungsverfahren	61
6.2	Auswahl eines geeigneten Optimierungsverfahrens	64
6.3	Evolutionäre Algorithmen.....	64
6.3.1	Evolutionstrategien	67
6.3.2	Kovarianz-Matrix-Adaption Evolutionstrategie	69
7	Erstellung des Optimierungswerkzeugs.....	73
7.1	Allgemeiner Programmablauf.....	73
7.2	Implementierung und Parametrisierung der Energiespeichermodelle	76
7.2.1	Modellierung der Antriebsstruktur	76
7.2.2	Modellierung des elektrischen Verhaltens der Lithium-Ionen- Batterie.....	77
7.2.3	Modellierung des elektrischen Verhaltens der Supercaps	79
7.2.4	Modellierung des Alterungsverhaltens der Lithium-Ionen- Batterie.....	80
7.2.5	Modellierung des Alterungsverhaltens der Supercaps	82
7.3	Festlegung der Kosten- und Straffunktion.....	82
7.4	Programmtechnische Umsetzung.....	84

7.4.1	Hauptprogramm (MATLAB-Script).....	86
7.4.2	Optimierungsprogramm (MATLAB-Script).....	86
7.4.3	RegelbasierteBS (MATLAB-Script).....	87
7.4.4	Zielfunktion (MATLAB-Script).....	88
7.5	Plausibilisierung des Optimierungswerkzeugs	88
8	Verifizierung des Batteriealterungsmodells	93
9	Anwendung des Optimierungswerkzeugs.....	101
9.1	Anwendung auf Fallbeispiele	101
9.1.1	NGT LINK Konzept 1 (ohne Laden)	105
9.1.2	NGT LINK Konzept 3 (dynamisches Laden)	110
9.1.3	Regio-Shuttle (dynamisches Laden)	113
9.1.4	Bewertung des Potentials kombinierter Energiespeichersysteme	116
9.2	Ausblick auf zukünftige Energiespeichertechnologien	118
9.2.1	Neuartige Supercaps	118
9.2.2	Neuartige Batterietechnologien	121
9.3	Diskussion der Ergebnisse	125
10	Zusammenfassung und Ausblick	129
A	Anhang.....	133
A.1	Eingangsdaten für das Hauptprogramm	133
A.2	Simulations- und Optimierungsparameter Plausibilisierung	135
A.3	Simulations- und Optimierungsparameter NGT LINK Konzept 1	137
A.4	Ergebnisse NGT LINK Konzept 1	139
A.5	Simulations- und Optimierungsparameter NGT LINK Konzept 3.....	141
A.6	Ergebnisse NGT LINK Konzept 3	143
A.7	Simulations- und Optimierungsparameter Regio-Shuttle	147
A.8	Ergebnisse Regio-Shuttle.....	149
A.9	Simulations- und Optimierungsparameter Regio-Shuttle neuartige Supercaps	153

A.10	Ergebnisse Regio-Shuttle neuartige Supercaps	155
A.11	Simulations- und Optimierungsparameter Regio-Shuttle Li-S ...	159
A.12	Ergebnisse Regio-Shuttle Li-S	161
	Publikationsliste	165
	Literaturverzeichnis.....	167