

Vorwort	vii
Nomenklatur	xxvii
1 Einleitung	1
1.1 Kopplung des Strom- und Verkehrssektors	3
1.2 Energieflexibles Elektrifiziertes Busdepot	4
2 Stand der Technik	7
2.1 Traktionsbatterien	8
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise von Lithium-Ionen-Akkumulatoren	8
2.1.2 Eigenschaften von Lithium-Ionen-Akkumulatoren	11
2.1.3 Gesundheitszustand und Degradation von Lithium-Ionen-Akkumulatoren	14
2.1.4 Nutzung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren	16
2.2 Ladetechnologien für Elektrofahrzeugdepots	18
2.2.1 Leistungsübertragung	18
2.2.2 Leistungswandlungssysteme für Elektrofahrzeuge	20
2.3 Elektrobussflotten	24
2.4 Gemischt-ganzzahlige Optimierungsverfahren	26
2.4.1 Lineare Optimierungsprobleme	29
2.4.2 Gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme	30
2.4.3 Lösungsalgorithmen für MILP Probleme	31
3 Elektrizitätsversorgungssystem in Deutschland	35
3.1 Erzeuger und Verbraucher	35
3.2 Elektrizitätsübertragung und Systemdienstleistungen	36
3.3 Handel Elektrischer Energie am Kurzfristigen Strommarkt	39
3.4 Netzstabilisierung durch Teilnahme am Regellenergemarkt	41
3.5 Handelsmodalitäten um den Lieferzeitpunkt	45
3.6 Eigenschaften und Entwicklungen des Strommarkts	46
3.6.1 Eigenschaften und Trends bei Stromprodukten	47
3.6.2 Eigenschaften und Trends bei Regellenergieprodukten	48
3.7 Treibhausgasemissionen bei der Stromerzeugung	49
4 Ladestrategien für Elektrofahrzeuge und Flotten	51
4.1 Ökonomische Ladestrategien	56
4.1.1 Ladestrategien für den Energiehandel	56
4.1.2 Netzdienliche Ladestrategien	57
4.1.3 Erhöhung der Batterielebensdauer	60

4.2	Ökologische Ladestrategien	60
4.3	Forschungsfragen zu Ladestrategien von Elektrobusflotten	61
5	Modellbildung und Optimierung	63
5.1	Elektrobusdepot im Stromnetz	64
5.1.1	Infrastrukturelle Anbindung des Busdepots ans Stromnetz	65
5.1.2	Modellierung der Strommarktprodukte	66
5.1.3	Energietransaktionen zwischen Busdepot und Strommarkt	68
5.2	Stromspeicher im Busdepot	69
5.2.1	Verfügbarkeit von Stromspeichern	69
5.2.2	Energietransaktionen von Stromspeichern	70
5.2.3	Energieinhalt in Stromspeichern	71
5.2.4	Degradation der Stromspeicher	71
5.3	Modellierung der Flexibilität	73
5.3.1	Leistungsflexibilität	73
5.3.2	Energieflexibilität	73
5.4	Modellierung der Zielfunktionen	76
5.4.1	Ökonomische Zielfunktion	76
5.4.2	Ökologische Zielfunktion	77
5.4.3	Zielfunktion für Lastspitzenkappung	77
5.5	Datengrundlage für die Optimierungen	78
5.5.1	Busdepotbezogene Datengrundlage	78
5.5.2	Strommarktbezogene Datengrundlage	80
5.6	Szenarioanalyse	83
5.6.1	Definition der Szenarien	83
5.6.2	Lösungsprozess	86
6	Auswertung der Optimierungsergebnisse	87
6.1	Energetische Bewertung der Szenarien	94
6.2	Ökonomische Bewertung der Szenarien	95
6.2.1	Ladestrategien für den Einkauf am Tagesmarkt	100
6.2.2	Ladestrategien für den Einkauf am Tagesmarkt und negative Regelenergie	101
6.2.3	Ladestrategien für den Tageshandel	103
6.2.4	Ladestrategien für Primärregelenergie	104
6.2.5	Ladestrategien für den Tageshandel, Primär- und Sekundärregelenergie	106
6.2.6	Regelbasierte Ladestrategien für Vortagesauktionen und Primärregelenergie	108
6.3	Ökologische Bewertung der Szenarien	110
6.4	Netzdienliche Bewertung der Szenarien	112
6.4.1	Belastung des Lokalen Verteilnetzes	112
6.4.2	Beitrag zur Frequenzhaltung	113
6.5	Auswirkungen auf Lithium-Ionen-Akkumulatoren	115
6.5.1	Vergleich der Ladezustandshäufigkeiten	115
6.5.2	Vergleich der Äquivalenten Vollzyklen	116
6.5.3	Vergleich der Zyklusamplituden	118
6.6	Gesamtheitliche Wirtschaftlichkeit des Strombezugs	121
7	Fazit und Ausblick	127
7.1	Fazit	127

7.2 Ausblick	129
Literaturverzeichnis	131
Anhang A – Allgemeine Ergänzungen	153
A.1 Ergänzungen zum Stand der Technik	153
A.1.1 Ergänzung zu Transformatoren	153
A.1.2 Ergänzung zu Ladetechnologien	154
A.2 Ergänzungen zum Elektrizitätsversorgungssystem	154
Anhang B – Ergänzungen zur Modellierung und dem Lösungsverfahren	157
B.1 Ergänzungen zur Modellierung	157
B.1.1 Ergänzungen zu Strommarktdaten	157
B.1.2 Ergänzungen zum Flottenmanagement	158
B.1.3 Ergänzungen zur Batteriedegradation	159
B.1.4 Ergänzungen zu Regelbasierten Ladestrategien	159
B.2 Ergänzungen zum Lösungsverfahren	160
Anhang C – Ergänzungen zu den Optimierungsergebnissen	161
C.1 Ergänzungen zur Ökonomischen Bewertung der Szenarien	161
C.1.1 Ergänzungen zu den Kosten und Erlösen	161
C.1.2 Ergänzende Heatmaps des Stromhandels	165
C.1.3 Ergänzende Heatmaps zur Aktivität am Regelenenergiemarkt	169
C.2 Ergänzungen zu Ladezuständen, Äquivalenten Vollzyklen und Zyklusamplituden	174
C.2.1 Verteilung der Ladezustände der Flotte	174
C.2.2 Äquivalente Vollzyklen	177
C.2.3 Zyklusamplituden der Speicher	177