

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Kurzfassung	VII
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XV
Nomenklatur	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2 Methodische und technologische Grundlagen	7
2.1 Methodische Grundlagen für die Bewertung komplexer Systeme im Busverkehr	7
2.1.1 Einführung in die Lebenszykluskostenbetrachtung	7
2.1.2 Einführung in die Prognose von Kostenentwicklungen.....	18
2.1.3 Einführung in die Modellierung von Standortentscheidungen zur Systemauslegung	31
2.2 Technologische Grundlagen urbaner elektrischer Bussysteme	40
2.2.1 Marktanalyse zu Stadtbussen und Marktchancen für Elektrobusse ..	41
2.2.2 Übersicht zu elektrischen Fahrzeugkonzepten im urbanen Busverkehr und derzeitige Entwicklungstrends	50
2.2.3 Eingrenzung der Buskonzepte für die Technologiebewertung.....	61
2.3 Ableitung des Forschungsbedarfs und der Zielsetzung für die vorliegende Arbeit	64
3 Modellentwicklung zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung elektrischer Bussysteme	67
3.1 Stand der Wissenschaft – Literaturüberblick.....	70
3.2 Anforderungen an das Modell	76
3.3 Modellaufbau und Grundannahmen der Modellierung.....	77
3.4 Energieverbrauchsberechnung und Generierung von Busrouten.....	81
3.5 Modellierung der Gesamtkosten.....	90
3.5.1 Investitionskosten Bus und Infrastruktur	93

3.5.1.1	Bus	94
3.5.1.2	Infrastruktur	98
3.5.1.3	Finanzierungskosten.....	103
3.5.2	Betriebskosten Bus und Infrastruktur.....	104
3.5.2.1	Energie- und Reagenskosten	105
3.5.2.2	Instandhaltungskosten	107
3.5.2.3	Personalkosten.....	111
3.5.2.4	Emissionskosten	113
3.5.2.5	Sonstige Kosten	115
3.5.3	Limitationen des Gesamtkostenmodells	115
3.6	Kostenprognosen der Modellparameter und der Umgang mit Unsicherheiten.....	116
3.6.1	Bestimmung der Kostendegressionen und Preisentwicklungen	119
3.6.2	Stochastische Eingangsparameter und Simulation.....	128
3.6.3	Limitationen bei Kostenprognosen und der Modellierung von Unsicherheiten.....	130
4	Berechnung und Ergebnisanalyse zur Bewertung elektrischer Linienbusflotten	131
4.1	Eingangsparameter und Berechnungsgrößen der Bewertung elektrischer Bussysteme.....	131
4.1.1	Makroökonomische Eingangsgrößen und unternehmensspezifische Randbedingungen zum Kapitaldienst	132
4.1.2	Linienprofil- und betriebsabhängige Eingangsgrößen.....	136
4.1.3	Technologieabhängige Parameterwerte und Berechnungsgrößen....	139
4.2	Ergebnisse und Diskussion der Bewertung elektrischer Bussysteme.....	149
4.2.1	TCO-Ergebnisse der Linienbusflotten	149
4.2.2	Diskussion der Ergebnisse	165
5	Zwischenfazit	169
6	Optimierung der Systemauslegung zur Elektrifizierung eines Linienbusnetzes	173
6.1	Einordnung und Relevanz des Optimierungsmodells	173

6.2	Standortentscheidungen zur Ladeinfrastrukturauslegung – Literaturüberblick	175
6.3	Herausforderungen und Einflussfaktoren auf die Schnellladeinfrastruktur im Busverkehr	182
6.4	Modellentwicklung zur Systemauslegung	186
6.4.1	Modellbildung in der Optimierungsumgebung GAMS	187
6.4.2	Simulation des Energiebedarfs und Validierung des Verfahrens mit Messdaten	193
6.4.3	Eingangsdaten und Ausgabegrößen der Optimierung	202
6.4.4	Grundannahmen der Modellierung	203
6.5	Limitationen des Optimierungsmodells	206
7	Technologiebewertung zur Elektrifizierung des Berliner Linienbusnetzes	207
7.1	Eingrenzung des betrachteten Busnetzes und Annahmen für die Modellanwendungen	207
7.2	Technisch-wirtschaftliche Bewertung der Buslinien auf Basis des TCO-Modells	213
7.2.1	Eingangsgrößen des Anwendungsfalls	213
7.2.2	Ergebnisse der Linienelektrifizierung	214
7.3	Systemauslegung des Linienbusnetzes auf Basis des Optimierungsmodells ..	222
7.3.1	Eingangsgrößen der Optimierung	222
7.3.2	Ergebnisse der Systemauslegung	227
7.3.3	Validierung des Optimierungsmodells	234
8	Fazit	239
8.1	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	239
8.2	Kritische Würdigung und Ausblick	244
	Literaturverzeichnis	247
	Anhang	285