

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 Energieverbrauchsrechnung 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 Reagenkosten	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

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Aufbau der vorliegenden Arbeit	5
Abbildung 2-1: Verteilung der Kosten über die Phasen des Produktlebenszyklus	11
Abbildung 2-2: Kostenstruktur eines TCO-Modells.....	12
Abbildung 2-3: Vorgehensweise für eine Lebenskostenzyklusbewertung aus Kundenperspektive	16
Abbildung 2-4: Häufigkeitsverteilung von Lernraten	21
Abbildung 2-5: Statische und dynamische Kosteneffekte	21
Abbildung 2-6: Qualitative Beschreibung der Erfahrungskurve als Funktion der kumulierten Produktionsmenge.....	28
Abbildung 2-7: Einstufung der Unsicherheit bei innovativen Technologien.....	31
Abbildung 2-8: Jährliche Neuzulassungen im Segment Stadtbus in der EU-27.....	45
Abbildung 2-9: Innovative emissionsfreie elektrische Bussysteme im ÖPNV	53
Abbildung 2-10: Übersicht zur Entwicklung der Schlüsselparameter von Lithium- Ionen-Batterien auf Zell- und Batteriepackebene.....	60
Abbildung 2-11: Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	66
Abbildung 3-1: Kostenfestlegung versus Kostenentstehung über den Lebenszyklus.....	67
Abbildung 3-2: Allgemeine Modellierung des Systems <i>Verkehrsunternehmen</i>	69
Abbildung 3-3: Aufbau des TCO-Berechnungsmodells für die technisch-wirtschaft- liche Bewertung innovativer Bussysteme	78
Abbildung 3-4: Durchschnittsgeschwindigkeit als Schlüsselparameter für den Energiebedarf	82
Abbildung 3-5: Kostenelemente des TCO-Modells zur Bewertung elektrischer Bussysteme	92
Abbildung 4-1: Jahresmittelwerte der Systemenergieverbräuche für die unterschiedlichen Busrouten und den Beschaffungszeitpunkt 2015 ...	150
Abbildung 4-2: Entwicklung der Fahrzeuganschaffungskosten im Basisszenario für die unterschiedlichen Beschaffungszeitpunkte.....	152
Abbildung 4-3: TCO-Gesamtwerte je Technologie und Route für das Basisszenario zum Beschaffungszeitpunkt 2015.....	153
Abbildung 4-4: TCO-Werte der betrachteten Technologien für die SORT 1-Route im Basisszenario	154

Abbildung 4-5: TCO-Werte der betrachteten Technologien für die OCC-Route im Basisszenario	155
Abbildung 4-6: TCO-Werte für die BS-Route in Abhängigkeit der Jahresflottenlaufleistung im Basisszenario zum Beschaffungszeitpunkt 2020.....	156
Abbildung 4-7: Kostendifferenz zum Dieselbusbetrieb in Abhängigkeit vom Dieselmotorkraftstoffpreis für die SORT 2-Route im Basisszenario zum Beschaffungszeitpunkt 2020	157
Abbildung 4-8: Sensitivitätsdiagramm zur Kostendifferenz zum Dieselbusbetrieb für das kOC-Konzept zur M&W-Route im Basisszenario zum Beschaffungszeitpunkt 2020	158
Abbildung 4-9: TCO-Werte mit reduziertem elektrischen Fahrzeugenergiebedarf je Route zum Beschaffungszeitpunkt 2025.....	159
Abbildung 4-10: Stochastische TCO-Simulation zur BS-Route in 2030.....	161
Abbildung 4-11: TCO-Verlauf für die SORT 1-Route mit Dieselfahrzeugen und ON-Bussen in Abhängigkeit vom Beschaffungszeitpunkt	162
Abbildung 4-12: CO ₂ -Vermeidungskosten je Busroute für die kostengünstigste Elektrifizierungsoption im Basisszenario in 2015 und 2020.....	162
Abbildung 6-1: Organisation der GAMS-Programmierung.....	187
Abbildung 6-2: SOC-Verlauf eines Busses im Betrieb mit Ladevorgängen an vorgesehenen Haltestellen.....	193
Abbildung 6-3: Vorgehen der Modellberechnung zur Systemauslegung.....	203
Abbildung 7-1: Betrachtetes Berliner Liniennetz bestehend aus 39 Buslinien.....	212
Abbildung 7-2: Gesamtkostenvergleich zur Elektrifizierung des Berliner Subnetzes ..	219
Abbildung 7-3: Gesamtkosten in Relation zum Dieselbetrieb für eine vollständige Netzelektrifizierung bei einem homogenen Technologieeinsatz	220
Abbildung 7-4: Elektrifiziertes Berliner Liniennetz bestehend aus 39 Buslinien.....	229
Abbildung 7-5: Anschaffungskosten der Elektrifizierung je Bus und Linie (<i>links</i>) sowie Kosten je Linienflotte (<i>rechts</i>).....	230
Abbildung 7-6: Infrastruktur- und Batteriekosten der untersuchten Szenarien.....	231

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Empfehlungen zum Einsatz eines Standard- oder Individualmodells...13
Tabelle 2-2:	Relativer Vergleich monetärer und wertbasierter TCO-Modelle15
Tabelle 2-3:	Auslegung der Ladeinfrastruktur für innovative elektrische Bussysteme als Querschnittsthema unterschiedlicher Forschungsrichtungen....39
Tabelle 2-4:	Globaler Busbestand und Markterwartungen nach Regionen.....43
Tabelle 2-5:	Beispiele zum Einsatz innovativer elektrischer Bussysteme in Europa.....58
Tabelle 3-1:	Literaturübersicht zu relevanten Kostenbewertungen alternativer Technologien im urbanen Busverkehr75
Tabelle 3-2:	Betrachtete Fahrzyklen und generierte Busrouten für die TCO-Bewertung89
Tabelle 3-3:	Marktentwicklungen elektrischer Busse für die Fokusz Märkte..... 118
Tabelle 3-4:	Metastudie zu Kostendegressionen von Lithium-Ionen-Batterien..... 121
Tabelle 3-5:	Metastudie zu Kostendegressionen von Brennstoffzellen 123
Tabelle 3-6:	Übersicht der jährlichen Kostendegressionen für das pessimistische (P), Basis- (B) und optimistische (O) Szenario 127
Tabelle 4-1:	Spezifikationen des Referenzfahrzeugs für die Modellberechnung..... 132
Tabelle 4-2:	Makroökonomische und unternehmensspezifische Modelleingangsparameter zur Bestimmung des Kapitaldienstes 134
Tabelle 4-3:	Durchschnittliche Energiekosten über eine Fahrzeugnutzungsdauer von 12 Jahren für die 4 Beschaffungszeitpunkte und die maximale Abweichung zum Basisszenario (B)..... 136
Tabelle 4-4:	Einsatzbedingungen der betrachteten Busrouten für die TCO-Bewertung 137
Tabelle 4-5:	Emissionskosten für die vier Beschaffungszeitpunkte 138
Tabelle 4-6:	Fahrzeugseitige monetäre Eingangsgrößen und technologische Parameterwerte für das Beschaffungsszenario 2015 142
Tabelle 4-7:	Jährliche Verbrauchseinsparungen und Steigerungen der Batterieenergiegedichten 143
Tabelle 4-8:	Infrastrukturseitige monetäre Eingangsgrößen und technologische Parameterwerte für das Beschaffungsszenario 2015 146

Tabelle 4-9:	Durchschnittliche Instandhaltungskosten für Fahrzeug und Infrastruktur für das Beschaffungsszenario 2015.....	148
Tabelle 4-10:	Übersicht der Berechnungswerte für die unterschiedlichen Technologien und Beschaffungszeitpunkte sowie Busrouten.....	150
Tabelle 6-1:	Modellparameter für die Simulation.....	197
Tabelle 6-2:	Mittlerer elektrischer Leistungsbedarf der Fahrzeugnebenverbraucher eines einzelnen Betriebstages als Funktion der mittleren Außentemperatur für unterschiedliche Bustypen.....	199
Tabelle 6-3:	Vergleich der Verbrauchswerte von Messfahrten und Simulation	201
Tabelle 6-4:	Eingangsdaten und Parameter für das Optimierungsmodell.....	202
Tabelle 7-1:	Extrapolationsfaktoren für Gelenkbusse	213
Tabelle 7-2:	Lebenszykluskosten der günstigsten Elektrifizierungsoption im Vergleich zum Dieselmotortrieb zu den vier Beschaffungszeitpunkten	216
Tabelle 7-3:	Übersicht der Simulationsszenarien zur Systemauslegung	227