

Elektrifizierung des gesamten STOAG-Busnetzes

Machbarkeitsstudie

Abschlussbericht, Juni 2020



Bildquelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:STOAG_718-III.jpg

Auftraggeber:
STOAG
Stadtwerke Oberhausen GmbH

Max-Eyth-Straße 62
46146 Oberhausen

<https://www.stoag.de/>

Auftragnehmer:
VCDB VerkehrsConsult
Dresden-Berlin GmbH

Standort Dresden

Könneritzstraße 31
01067 Dresden
Tel.: +49 .351 .4 82 31-00
Fax: +49 .351 .4 82 31-09
E-Mail: dresden@vcdb.de

Internet: www.vcdb.de

Ansprechpartner:
Christine Schwärzel-Lange
c.schwaerzel-lange@vcdb.de

Jan Schwarzenberger
j.schwarzenberger@vcdb.de

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	15
1 Hintergrund.....	23
1.1 Ausgangslage.....	23
1.2 Grundannahmen.....	23
1.1 Zielsetzung.....	24
1.3 Zielgruppen der Untersuchung	25
2 Vorgehensweise	26
2.1 Liniennetz- und Umlaufanalyse	26
2.2 Datenerfassung und Evaluation	27
2.3 Detailuntersuchung eines Umlaufs	28
2.4 Energiebilanzierung und Systemauslegung.....	32
2.5 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung.....	33
2.6 Ausweisung ökologischer Parameter	36
3 Untersuchungsbasis	38
3.1 Fahrzeugkonfiguration	38
3.2 Kosten	38
3.3 Betriebliche Rahmenbedingungen.....	39
3.3.1 Linienbetrieb	39
3.3.2 Analyse der Umlaufdaten.....	43
4 Repräsentative Umläufe	48
4.1 Vorgehen zur Bildung der repräsentativen Umläufe.....	48
4.2 Festlegen der repräsentativen Umläufe	48
4.3 Soll-Daten (übergebene Umlaufdaten)	52

Inhaltsverzeichnis

5	Energiebilanzierung	53
5.1	Eingangsdaten.....	53
5.1.1	Grundannahmen (ohne betriebliche Änderungen)	53
5.1.2	Spezifischer Energiebedarf je Referenzszenario	54
5.1.3	Auslegung Fahrzeugspeicher	55
5.2	Bewertung Vollladereinsatz	56
5.2.1	Berechnungsgleichung zur Bewertung des VL-Einsatzes.....	57
5.2.2	Bewertung des Vollladereinsatzes am Beispiel des Umlaufs 09310	59
5.2.3	Bewertung des Vollladereinsatzes gemäß Eingangsdaten (Status Quo)	59
5.2.4	Bewertung des Vollladereinsatzes mit reduzierter Platzkapazität	61
5.2.5	Bewertung des Vollladereinsatzes mit geteilten Umläufen.....	63
5.3	Bewertung Gelegenheitsladereinsatz	72
5.4	Untersuchung der geplanten E-Buslinien SB97/952, 953/961, 955 und 956	76
5.4.1	Ladepunktoffene Betrachtung	76
5.4.2	Ladepunktfeste Betrachtung	96
5.4.3	Ladepunktfeste Betrachtung, mit geänderter Verspätungslage	100
5.4.4	Festlegungen der STOAG nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie.....	105
6	Betriebliche Bewertung.....	106
6.1	Betriebskonzept	106
6.1.1	Priorität 1 (VL1) Volllader ohne betriebliche Anpassungen	107
6.1.2	Priorität 2 (GL1) Gelegenheitslader mit Ladepunkten an den Endpunkten OSB, NMK, AFR, WEH	108

Inhaltsverzeichnis

6.1.3	Priorität 3 (GL2) Gelegenheitslader mit Ladepunkten an den Endpunkten FAL, FRÖ und HOB	109
6.1.4	Priorität 4 (VL2) Volllader mit Teilung der Umläufe	110
6.1.5	Umlaufspezifische Kenndaten nach VL- und GL- Zuordnung	111
6.2	Umsetzungsstufen	111
6.3	Ladeinfrastruktur Betriebshof	117
6.4	Ladeinfrastruktur Strecke	123
6.5	Festlegungen der STOAG nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie.....	124
7	Ökonomische Betrachtung	125
7.1	Grundlagen.....	125
7.2	Investitionskostenbetrachtung	131
7.2.1	Investitionskosten für Stufe 1	132
7.2.2	Investitionskosten für Stufe 2	133
7.2.3	Investitionskosten für Gesamtumstellung.....	135
7.2.4	Investitionskosten für 1 Solo-Elektrobus und 1 Gelenk-Elektrobus.....	136
7.3	Gesamtkostenbetrachtung	137
7.3.1	Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	138
7.3.2	Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	140
7.4	Festlegungen der STOAG nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie.....	152
8	Ökologische Betrachtung / Umweltbilanzierung.....	153
8.1	Grundlagen der ökologischen Betrachtung	153
8.2	Ergebnisse der ökologischen Betrachtung	155
8.3	Festlegungen der STOAG nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie.....	163
9	Technologiebetrachtung des Elektrobussystems...	164
9.1	Elektrisches Antriebskonzept	164
9.1.1	Überblick.....	164

Inhaltsverzeichnis

9.1.2	Batteriebus.....	165
9.2	Elektrische Energiezuführung.....	169
9.2.1	Überblick.....	169
9.2.2	Fahrzeugseitiges Ladegerät (Plug-In System).....	171
9.2.3	Externes Ladegerät (Plug-In System)	174
9.2.4	Docking-Station.....	177
9.3	Leistungsverteilung auf dem Betriebshof	180
9.3.1	Überblick.....	180
9.3.2	Übergabestation	181
9.3.3	Betriebshofverteilnetz	183
9.3.4	Transformatorstation und Integration der Ladegeräte	185
10	Umsetzungsempfehlung	189
	Anhangsverzeichnis	193

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Verlaufskurve Jahresmehrkosten (Lesebeispiel)	35
Abbildung 3.1:	Histogramm der Umlauflängen (MoDo)	44
Abbildung 3.2:	Histogramm der Durchschnittsgeschwindigkeit der Umläufe (MoDo)	45
Abbildung 3.3:	Erste Einschätzung zur Ladestrategie	46
Abbildung 4.1:	Linienverläufe der Linien nach Referenzszenario	51
Abbildung 5.1:	Formel zur Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs	58
Abbildung 5.2:	Formel zur Bewertung des VL-Einsatzes	58
Abbildung 5.3:	Bewertung VL-Einsatz am Beispiel Umlauf 09310	59
Abbildung 5.4:	Gleichung zur Bewertung der Umlaufteilung	66
Abbildung 5.5:	Gleichung zur Ermittlung des Umlaufteilers	67
Abbildung 5.6:	Gleichung zur Ermittlung der Umlauflängen der Teilumläufe	67
Abbildung 5.7:	Gleichung zur Ermittlung der Umlaufzeiten der Teilumläufe	67
Abbildung 5.8:	Formel zur Ermittlung der Ladezeit	68
Abbildung 5.9:	Verknüpfung von Umläufen (Beispiel)	70
Abbildung 5.10:	Eingangsgrößen zur Ermittlung der nutzbaren Ladezeit	74
Abbildung 5.11:	Gleichung zur Ermittlung der nutzbaren Ladezeit	74
Abbildung 5.12:	Gleichung zur Ermittlung der nutzbaren Energie	74
Abbildung 5.13:	Gleichung zur Bewertung des GL-Einsatzes	74
Abbildung 5.14:	SOC-Verlauf Umlauf 95240, ohne Verspätung, 1 LP EVE	83
Abbildung 5.15:	SOC-Verlauf Umlauf 95240, mit Verspätung, 1 LP EVE	84
Abbildung 5.16:	SOC-Verlauf Umlauf 95240, mit Verspätung, 2 LP EVE & AFR	85
Abbildung 5.17:	SOC-Verlauf Umlauf 96142, ohne Verspätung, 1 LP SPC	86
Abbildung 5.18:	SOC-Verlauf Umlauf 96142, mit Verspätung, 1 LP SPC	87
Abbildung 5.19:	SOC-Verlauf Umlauf 95501, ohne Verspätung, 1 LP AFR	89

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5.20:	SOC-Verlauf Umlauf 95501, mit Verspätung, 1 LP AFR	90
Abbildung 5.21:	SOC-Verlauf Umlauf 95501, mit Verspätung, 2 LP AFR & HBG	91
Abbildung 5.22:	SOC-Verlauf Umlauf 95602, ohne Verspätung, 1 LP WEH	93
Abbildung 5.23:	SOC-Verlauf Umlauf 95602, mit Verspätung, 1 LP WEH	94
Abbildung 5.24:	SOC-Verlauf Umlauf 95602, mit Verspätung, 2 LP WEH & GOE	95
Abbildung 5.25:	SOC-Verlauf Umlauf 95240, 1 LP AFR, mit Verspätung (2+1 min; 80 %)	101
Abbildung 5.26:	SOC-Verlauf Umlauf 95240NF, 1 LP AFR, mit Verspätung (2+1 min; 80 %)	102
Abbildung 5.27:	SOC-Verlauf Umlauf 95501, 1 LP AFR, mit Verspätung (2+1 min; 80 %)	104
Abbildung 6.1:	Leistung, 75 kW, Stufe 3, feste Leistung, ohne Verluste	119
Abbildung 6.2:	Leistung, 150 kW, Stufe 3, feste Leistung, ohne Verluste, Optimierung durch Verschieben der Ladezeitfenster	121
Abbildung 7.1:	Gesamtüberblick über ermittelte Kosten für Umstellungsstufen	129
Abbildung 7.2:	Gesamtüberblick über ermittelte Kosten für Einzelfahrzeugbetrachtung	130
Abbildung 7.3:	Investitionskosten für Stufe 1 – 15 Solo- Elektrobusse	133
Abbildung 7.4:	Investitionskosten für Stufe 2 – 68+4 Solo- Elektrobusse	134
Abbildung 7.5:	Investitionskosten für Gesamtumstellung - 68+4 Solo-Elektrobusse und 52+9 Gelenk-Elektrobusse	135
Abbildung 7.6:	Investitionskosten für 1 Solo-Elektrobus (Umlage der Kosten aus Daten der Gesamtumstellung)	136
Abbildung 7.7:	Investitionskosten für 1 Gelenk-Elektrobus (Umlage der Kosten aus Daten der Gesamtumstellung)	137
Abbildung 7.8:	Kostenpositionen Betriebs- und Investitionskosten für Stufe 1 – 15 Solo-Elektrobusse	143
Abbildung 7.9:	Durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten für Stufe 1 – 15 Solo-Elektrobusse – für drei verschiedene Kostenentwicklungsszenarien	144

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 7.10:	Kostenpositionen Betriebs- und Investitionskosten für Stufe 2 - 68+4 Solo-Elektrobusse	145
Abbildung 7.11:	Durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten für Stufe 2 (68 + 4 Solo-Elektrobusse) für drei verschiedene Kostenentwicklungsszenarien	146
Abbildung 7.12:	Kostenpositionen Betriebs- und Investitionskosten für Gesamtstellung - 68 + 4 Solo-Elektrobusse sowie 52 + 9 Gelenk-Elektrobusse	147
Abbildung 7.13:	Durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten für Gesamtumstellung (68 + 4 Solo- und 52 + 9 Gelenk-Elektrobusse) für drei verschiedene Kostenentwicklungsszenarien	148
Abbildung 7.14:	Betriebs- und Investitionskosten für 1 Solo-Elektrobus von Gesamtumstellung ausgehend	149
Abbildung 7.15:	Betriebs- und Investitionskosten für 1 Gelenk-Elektrobus von Gesamtumstellung ausgehend	150
Abbildung 7.16:	Durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten für einen einzelnen Solo-Elektrobus im Rahmen der Gesamtumstellung für drei verschiedene Kostenentwicklungsszenarien	151
Abbildung 7.17:	Durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten für einen einzelnen Gelenk-Elektrobus im Rahmen der Gesamtumstellung für drei verschiedene Kostenentwicklungsszenarien	152
Abbildung 8.1:	Berechnungsparameter für Umweltbewertung	155
Abbildung 8.2:	Ökologische Betrachtung (Well-to-Wheel-Kette) _Stufe 1	156
Abbildung 8.3:	Treibhausgasvermeidungskosten _Stufe 1	157
Abbildung 8.4:	Ökologische Betrachtung (Well-to-Wheel-Kette) - Stufe 2	159
Abbildung 8.5:	Treibhausgasvermeidungskosten _Stufe 2	160
Abbildung 8.6:	Ökologische Betrachtung (Well-to-Wheel-Kette) _Gesamtumstellung	162
Abbildung 8.7:	Treibhausgasvermeidungskosten _Stufe 3	163
Abbildung 9.1:	Konfigurationsmöglichkeiten Elektrobus	165
Abbildung 9.2:	Möglichkeiten der Energiezuführung	171
Abbildung 9.3:	Belegung Typ-2-Kupplung und -Stecker nach IEC 62196	172
Abbildung 9.4:	Ladekabel AC-Ladung (Mode 2)	173
Abbildung 9.5:	Ladekabel AC-Ladung (Mode 3)	173

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 9.6:	Belegung Combo-2-Kupplung und -Stecker nach IEC 62196.....	175
Abbildung 9.7:	Hub-Docking-Station	178
Abbildung 9.8:	Senk-Docking-Station.....	178
Abbildung 9.9:	Konzeption Übergabestation, ohne Redundanz nach (Siemens AG, 2018).....	181
Abbildung 9.10:	Konzeption Übergabestation, mit redundanter Einspeisung nach (Siemens AG, 2018)	182
Abbildung 9.11:	Konzeption Übergabestation, mit redundanter Einspeisung und getrennten Verrechnungsmessfelder nach (Siemens AG, 2018)	183
Abbildung 9.12:	Mittelspannungsnetzform Stich nach (Siemens AG, 2018)	184
Abbildung 9.13:	Mittelspannungsnetzform Ring nach (Siemens AG, 2018)	184
Abbildung 9.14:	Ladeinfrastruktur, dezentrale Transformatorstationen und zentrale Ladegeräte (eigene Darstellung)	186
Abbildung 9.15:	Ladeinfrastruktur, zentrale Transformatorstation und dezentrale Ladegeräte (eigene Darstellung).....	187

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Einstufungskriterien SORT	30
Tabelle 2.2:	Einstufungskriterien TOPO	30
Tabelle 3.1:	Fremdunternehmen mit Linien und Umläufen (MoDo)	40
Tabelle 3.2:	Subunternehmen mit Linien und Umläufen (MoDo)	41
Tabelle 3.3:	Anzahl der Busse nach Fahrzeugtyp	41
Tabelle 3.4:	Endhaltestellen, bedient durch mehrere Linien	43
Tabelle 4.1:	Repräsentative und zusätzliche Umläufe	52
Tabelle 5.1:	Ermittelter spezifischer Energiebedarf_Grundannahme	55
Tabelle 5.2:	Anzahl der als VL elektrifizierbaren Umläufe (Status Quo)	60
Tabelle 5.3:	Laufleistung der als VL elektrifizierbaren Umläufe (Status Quo)	61
Tabelle 5.4:	Anzahl der als VL elektrifizierbaren Umläufe (mit eingeschränkter Platzkapazität)	62
Tabelle 5.5:	Laufleistung der als VL elektrifizierbaren Umläufe (mit eingeschränkter Platzkapazität)	63
Tabelle 5.6:	Spezifischer Energiebedarf und Reichweite nach Bustyp und Referenzszenario	65
Tabelle 5.7:	Durchschnittliche Längen der Aus- und Einrückefahrten	66
Tabelle 5.8:	Durchschnittliche Dauer der Aus- und Einrückefahrten	66
Tabelle 5.9:	Spezifische Umlaufdaten (09310, 09316)	69
Tabelle 5.10:	Spezifische Umlaufdaten nach Umlaufteilung (09310, 09316)	69
Tabelle 5.11:	Übersicht Mehrbedarfe bei Vollladereinsatz	71
Tabelle 5.12:	Anzahl der als GL elektrifizierbaren Umläufe	75
Tabelle 5.13:	Laufleistung der als GL elektrifizierbaren Umläufe	75
Tabelle 5.14:	Angenommene Verspätungen, gemäß Eingangsdaten	77
Tabelle 5.15:	Übersicht Ladepunkte und mittlere, zur Verfügung stehende Ladezeiten im verspätungsfreien Fall	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.16:	Wendezeiten ohne und mit Verspätung.....	80
Tabelle 5.17:	Auswahlkriterien für die Auswahl als repräsentativer Umlauf für die jeweiligen Linien.....	81
Tabelle 5.18:	Bewertung GL-Einsatz ohne und mit Verspätung (SOLL-Daten) _ Linie SB97/952.....	82
Tabelle 5.19:	Bewertung GL-Einsatz ohne und mit Verspätung (SOLL-Daten) _ Linie 953/961	86
Tabelle 5.20:	Bewertung GL-Einsatz ohne und mit Verspätung (SOLL-Daten) _ Linie 955	88
Tabelle 5.21:	Bewertung GL-Einsatz ohne und mit Verspätung (SOLL-Daten) _ Linie 956	92
Tabelle 5.22:	Erforderliche Ladepunkte bei ladepunktoffener Betrachtung.....	96
Tabelle 5.23:	Umsetzungsempfehlung bei ladepunktfester Betrachtung.....	99
Tabelle 5.24:	Ausfall von Ladehalten Linie SB97/952.....	102
Tabelle 5.25:	Ausfall von Ladehalten Linie 953/961	103
Tabelle 5.26:	Ausfall von Ladehalten Linie 955	104
Tabelle 5.27:	Ausfall von Ladehalten Linie 956	105
Tabelle 6.1:	Linien und Umläufe Priorität 2 (GL1).....	109
Tabelle 6.2:	Linien und Umläufe Priorität 3 (GL2).....	110
Tabelle 6.3:	Anzahl Umläufe nach VL- und GL-Einstufung (ohne Teilung Umläufe VL2)	111
Tabelle 6.4:	Kennziffern der Umsetzungsstufen.....	113
Tabelle 6.5:	Laufleistung, Einsatzzeit, Anzahl Umläufe – Stufe 1....	114
Tabelle 6.6:	Laufleistung, Einsatzzeit, Anzahl Umläufe -Stufe 2	115
Tabelle 6.7:	Laufleistung, Einsatzzeit, Anzahl Umläufe; Gesamtumstellung	116
Tabelle 6.8:	Maximaler Leistungsbedarf bei 75 kW Ladeleistung / gleichmäßiger Ladung	119
Tabelle 6.9:	Maximaler Leistungsbedarf bei 100 kW Ladeleistung / gleichmäßiger Ladung	120
Tabelle 6.10:	Ausbau der Ladeinfrastruktur Betriebshof	123
Tabelle 7.1:	Jahresbetriebsdauer und Jahreslaufleistung (STOAG+SUB Wohlgemuth).....	126
Tabelle 7.2:	Anzahl der Busse gegliedert nach TCO-Dateien und Umstellungsstufen.....	127
Tabelle 7.3:	Kriterien für Betrachtungsszenarien.....	141
Tabelle 10.1:	Umsetzungsplan, 06/2020.....	191

Abkürzungsverzeichnis

AC	...	Wechselstrom (alternating current)
BMU	...	Bundesministerium für Umwelt
DC	...	Gleichstrom (direct current)
GB	...	Gelenkbus
GL	...	Gelegenheitslader
ICCB		In-Cable Control Box
IEC	...	International Electrotechnical Commission
IK	...	Investitionskosten
LIS	...	Ladeinfrastruktur
LP	...	Ladepunkt
ÖPNV	...	Öffentlicher Personennahverkehr
PM	...	Particulate Matter
RSZ	...	Referenzszenario
SB	...	Solo-/Standardbus
SOC	...	State of Charge
SORT	...	Standardised On-Road Test cycles
TCO	...	total cost of ownership (Gesamtkosten des Betriebs)
UITP		Union Internationale des Transports Publics
VCDB	...	VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH
VL	...	Volllader
VNB	...	Verteilnetzbetreiber
VRR	...	Verkehrsverbund Rhein-Ruhr

Zusammenfassung

Um ein für Oberhausen optimales Einsatzkonzept für den Elektrobusbetrieb zu entwickeln, wurde im Rahmen der Machbarkeitsstudie der Elektrobusbetrieb planerisch, unter Berücksichtigung der bestehenden Rahmen- und Einsatzbedingungen, im gesamten Liniennetz der STOAG abgebildet und dem konventionellen Dieselbusbetrieb gegenübergestellt. Maßgebend für die Untersuchung sind das Beibehalten von bestehenden Linienverknüpfungen, das Einbeziehen Sub- und Fremdunternehmenleistungen sowie eine Abbildung des Elektrobusbetriebs mit möglichst geringen betrieblichen Eingriffen. Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie werden als Grundlage für das Umsetzungskonzept zur schrittweisen Ausweitung des Elektrobusbetriebs in Oberhausen herangezogen.

Vollladereinsatz: Entsprechend der Zielsetzung, den Elektrobusbetrieb mit möglichst geringfügigen Änderungen am bestehenden Betrieb abbilden zu können, wurde das Liniennetz vorerst hinsichtlich des Einsatzes von Elektrobussen mit ausschließlicher Nachladung im Betriebshof – dies entspricht dem Einsatz von Vollladern (VL) – untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Sicherstellung eines dem Dieselbus identischen Busbetriebs (Platzangebot beim Gelenkbus 130 Plätze und beim Solobus 90 Plätze), nur ca. 25 % der insgesamt 188 Umläufe als Volllader betrieben werden können. Der Laufleistungsanteil entspricht dabei nur 5,1 % der Gesamtleistung. Ein VL-Einsatz ist demnach mit betrieblichen Einschränkungen verbunden.

Um den VL-Anteil im Liniennetz zu erhöhen, wurde im nächsten Untersuchungsschritt die Platzkapazität um ein vertretbares Maß – auf 100 Plätze beim Gelenkbus und 70 Plätze beim Standardbus – angepasst. Unter Einhaltung des zulässigen Fahrzeuggesamtgewichts könnte durch eine geringere Platzkapazität ein größerer Energiespeicher verbaut werden. Die folglich zur Verfügung stehende höhere Speicherkapazität führt zu einer höheren erzielbaren Reichweite. Mit dem höher dimensionierten Fahrzeugspeicher kann der Energiebedarf von 35 % der Umläufe gedeckt werden. Dies entspricht einer Steigerung um 10 %. Der Laufleistungsanteil

Zusammenfassung

der VL-Umläufe erhöht sich lediglich um 6,8 %-Punkte auf 11,9 % der Gesamtaufleistung. Die Anpassung der Platzkapazität allein reicht demnach nicht aus, um den VL-Betrieb im Gesamtnetz sicherstellen zu können.

Um das gesamte Liniennetz mit VL betreiben zu können, sind weiterführende betriebliche Maßnahmen, wie die Reduzierung der Laufleistung durch Verkürzung der Umläufe notwendig. Dies führt zu einem erheblichen Fahrzeugmehrbedarf (von bis zu 50 %). Im Rahmen der Machbarkeitsstudie konnte festgestellt werden, dass ein ausschließlicher VL-Einsatz unter den bestehenden betrieblichen Vorgaben nicht abbildbar ist.

Gelegenheitsladereinsatz: Alternativ zum Ladekonzept des Vollladers wurde daher das Liniennetz hinsichtlich des Einsatzes von Gelegenheitsladern (GL) untersucht. Unter den getroffenen Annahmen und unter der Voraussetzung, dass alle erforderlichen Endhaltestellen als Ladepunkte mit einer Ladeleistung von mindestens 300 kW ausgebaut werden können, ist eine Umstellung weitestgehend aller Umläufe auf GL-Betrieb möglich.

Betriebskonzept: Das Betriebskonzept soll die betrieblichen (flexibler Betrieb, geringe betriebliche Anpassungen, bevorzugter VL-Einsatz), technischen (eine Fahrzeugkonfiguration für Voll- und Gelegenheitsladereinsatz) und wirtschaftlichen (geringe Mehraufwendungen) Anforderungen der STOAG an den Elektrobusbetrieb berücksichtigen. Das Konzept sieht einen Mischbetrieb von Voll- und Gelegenheitsladern vor.

Die Festlegung der Ladepunkte erfolgte nach erster Einschätzung der Ladestandorte auf Umsetzungsfähigkeit. Die Ladepunkte sollen an wenigen Stellen in der Stadt konzentriert und durch möglichst viele Linien bedient werden, so dass eine hohe Auslastung der Ladepunkte erzielt werden kann.

Ein einheitliches Fahrzeugkonzept soll zum einen die betriebliche Flexibilität beim Fahrzeugeinsatz erhöhen. Zum anderen können Reservevorhaltungen flexibel gestaltet werden. Die Werkstatt ist entsprechend auch nur auf ein Fahrzeug- und Ladeinfrastruktursystem auszulegen.

Die Festlegung der als VL bzw. GL zu betreibenden Umläufe folgt folgendem Vorgehen:

- ▶ Priorität 1: Auswahl aller Umläufe, die ohne betriebliche Anpassungen als Volllader abbildbar sind.
- ▶ Priorität 2: Auswahl aller Umläufe, die als Gelegenheitslader die zwei vorhandenen Ladestandorte Sterkrade Bahnhof und Neumarkt sowie

Zusammenfassung

die geplanten Ladestandorte Wehrstraße und Anne-Frank-Realschule nutzen.

- ▶ Priorität 3: Auswahl aller Umläufe, die als Gelegenheitslader die im Rahmen der Ladestandortuntersuchung als günstig eingeschätzten Ladestandorte nutzen.
- ▶ Priorität 4: Auswahl aller restlichen Umläufe, an denen betriebliche Anpassungen – wie zusätzlicher Fahrzeugeinsatz – vorzunehmen sind, um den VL-Einsatz abbilden zu können.

Umsetzungsstufen: Als Grundlage für das Umsetzungskonzept wurden Umsetzungsstufen definiert, die die schrittweise Umstellung des Dieselbusbetriebs auf Elektrobusbetrieb darstellen. In den Umsetzungsstufen wurden Anzahl und Art der geplanten Fahrzeuge und entsprechender Ladeinfrastruktur in zeitlich definierten Abschnitten festgelegt.

Betrachtet wurden die Umläufe der STOAG und eines Subunternehmers, da diese mit den Fahrzeugen der STOAG bedient werden. Die Umsetzungsstufen werden als Betrachtungsgrundlage für die ökonomische Bewertung (s. Tabelle „Wirtschaftlichkeit“) und die Umweltbilanzierung (s. Tabelle „Ökologie“) herangezogen.

Folgende drei Umsetzungsstufen wurden definiert:

- ▶ Stufe 1: 15 Solobusse als Gelegenheitslader
- ▶ Stufe 2: 68 + 4 Solobusse (Laderegime nach Priorität 1 bis 4)
- ▶ Stufe 3: 68 + 4 Solobusse und 52 + 9 Gelenkbusse (Laderegime nach Priorität 1 bis 4)

Durch den Einsatz von Vollladern, entsprechend Priorität 4, erhöht sich der erforderliche Fahrzeugbedarf um 4 Standardbusse und 9 Gelenkbusse.

Zur Abbildung des Elektrobusbetriebs bei der STOAG erhöht sich der Gesamtfahrzeugbedarf von 120 Fahrzeugen auf 133 Fahrzeuge.

Der konfigurierte Solo-Elektrobus verfügt über 70 Plätze und einem Batteriespeicher von 409 kWh (brutto) / 327 kWh (netto). Der Gelenk-Elektrobus verfügt über 100 Plätze und einem Speicher von 466 kWh (brutto) / 373 kWh (netto). Als Heizungssystem findet die Wärmepumpe Anwendung.

Die wirtschaftliche und ökologische Bewertung des Elektrobusbetriebs ist in den folgenden Tabellen zusammenfassend dargestellt.

Zusammenfassung

Festlegungen der STOAG nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie:

Im Zuge der Erarbeitung der Machbarkeitsstudie wurde der Endpunkt Anne-Frank-Realschule als geeigneter Ladestandort ermittelt und zur Nachladung der Linien SB97/952 und 955 herangezogen. Durch die STOAG wurde nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie beschlossen, dass der Endpunkt Anne-Frank-Realschule vorerst nicht als Ladepunkt realisiert werden kann. Daraus ergeben sich folgende Änderungen, die in den Ausführungen dieser Machbarkeitsstudie nicht berücksichtigt wurden:

- ▶ *Die Umstellung der Linie 955 auf Elektrobusbetrieb erfolgt nicht in Umsetzungsstufe 1, sondern zu einem späteren Zeitpunkt (voraussichtlich in Umsetzungsstufe 2).*
- ▶ *Alternativ zum Endpunkt Anne-Frank-Realschule sollen die Endpunkte Everslohstraße (Linie SB97/952, Stufe 1) und Heinrich-Böll-Gesamtschule (Linie 955, Stufe 2) als Ladepunkte ausgebaut werden.*

Auf die Festlegungen zu den Ladestandorten und den Umsetzungsstufen wurde zudem in der Machbarkeitsstudie in den Kapiteln 6, 7, 8, 9 und 10 verwiesen.

Zusammenfassung

Wirtschaftlichkeit	Investitionskosten Total Cost of Ownership		ohne Förderung	Landes- förderung 60 % Fahrzeuge 90 % LIS+Werkst.	Bundes-/Landes- förderung 80 % Fahrzeuge 90 % LIS+Werkst.
1. Stufe	IK	Fahrzeuge	11.601.525 €	6.368.610 €	4.624.305 €
15 E-Busse		LIS	5.249.499 €	524.950 €	524.950 €
<i>15 Solo-E-Busse</i>		Sonstiges	1.454.508 €	642.619 €	642.619 €
<i>15 Dieselbusse</i>		Gesamt	18.305.532 €	7.536.179 €	5.791.874 €
	TCO	Gesamt	66.389.302 €	55.369.551 €	53.363.601 €
		Ø Betr./IK	4,03 €/km	3,36 €/km	3,24 €/km
		Kostenvergl.	0,82 €/km	0,15 €/km	0,03 €/km
2. Stufe	IK	Fahrzeuge	55.687.320 €	30.569.328 €	22.196.664 €
72 E-Busse		LIS	11.577.312 €	1.157.731 €	1.157.731 €
<i>72 Solo-E-Busse</i>		Sonstiges	2.720.071 €	1.275.400 €	1.275.400 €
<i>68 Dieselbusse</i>		Gesamt	69.984.702 €	33.002.460 €	24.629.796 €
	TCO	Gesamt	232.648.688 €	183.491.968 €	173.863.404 €
		Ø Betr./IK	4,58 €/km	3,62 €/km	3,43 €/km
		Kostenvergl.	1,30 €/km	0,33 €/km	0,14 €/km
Gesamtflotte	IK	Fahrzeuge	117.234.490 €	65.765.596 €	48.609.298 €
133 E-Busse		LIS	16.243.322 €	1.624.332 €	1.624.332 €
<i>72 Solo-E-Busse</i>		Sonstiges	3.653.273 €	1.742.001 €	1.742.001 €
<i>61 Gelenk-E-Busse</i>		Gesamt	137.131.085 €	69.131.930 €	51.975.632 €
<i>120 Dieselbusse</i>	TCO	Gesamt	450.076.261 €	361.957.380 €	342.227.638 €
		Ø Betr./IK	4,40 €/km	3,53 €/km	3,34 €/km
		Kostenvergl.	1,14 €/km	0,27 €/km	0,08 €/km

Zusammenfassung

Wirtschaftlichkeit	Investitionskosten Total Cost of Ownership		ohne Förderung	Landes- förderung 60 % Fahrzeuge 90 % LIS+Werkst.	Bundes-/Landes- förderung 80 % Fahrzeuge 90 % LIS+Werkst.
1 Solobus	IK	Fahrzeuge	773.435 €	424.574 €	308.287 €
		LIS	122.130 €	12.213 €	12.213 €
		Sonstiges	27.468 €	13.098 €	13.098 €
		Gesamt	923.033 €	449.885 €	333.598 €
	TCO	Gesamt	3.241.071 €	2.616.646 €	2.481.010 €
		Ø Betr./IK	4,60 €/km	3,71 €/km	3,52 €/km
		Kostenvergl.	1,02 €/km	0,13 €/km	-0,06 €/km
1 Gelenkbus	IK	Fahrzeuge	1.008.970 €	576.988 €	432.994 €
		LIS	122.130 €	12.213 €	12.213 €
		Sonstiges	27.468 €	13.098 €	13.098 €
		Gesamt	1.158.568 €	602.299 €	458.305 €
	TCO	Gesamt	3.552.773 €	2.845.227 €	2.681.884 €
		Ø Betr./IK	4,20 €/km	3,36 €/km	3,17 €/km
		Kostenvergl.	1,25 €/km	0,41 €/km	0,22 €/km

Umstellungsstufen:

- 1. Stufe: 15 E-Busse (Linien SB97/952, 953/961, 955, 956)
- 2. Stufe: 68 + 4 E-Busse (alle Solobuslinien)
- Gesamtumstellung: 120 + 13 E-Busse (68 + 4 Solobusse, 52 + 9 Gelenkbusse)

Fördererszenarien:

- Landesförderung: 60 % IK-Mehrkosten E-Bus + 90 % LIS & Werkstattausrüstung
- Bundes-/Landesförderung: 60 % Land & 20 % Bund IK-Mehrkosten E-Bus + 90 % LIS & Werkstattausrüstung

TCO (Total Cost of Ownership):

- Betrachtungszeitraum 12 Jahre;
- Ø Betriebs- und Investitionskosten: Fahrzeug, Infrastruktur, Projektkosten, Betriebskosten Strecke, Kapitalverzinsung)
- Kostenvergleich Mehr-/ Minderkosten zum Dieselbus

IK (Investitionskosten):

- Fahrzeuge: Grundfahrzeug, Traktionsausrüstung, Nebenaggregate, fahrzeugseitige LIS, Energiespeicher
- LIS (Ladeinfrastruktur): Trafostation (Kompaktstation), Ladestation Docking-Station, Lademastanlage Hub-Docking-Station, Übergabestation, Messschrank, Errichtungs- und Montagekosten, Erschließungs- und Anschlusskosten Unterwerk ans Mittelspannungsnetz
- Sonstiges: Werkstattausrüstung (Dacharbeitsstand, Flurfördertechnik), sonstige Projektkosten (Projektmanagement)

Zusammenfassung

Ökologie		Well-to-Tank	Tank-to-Wheel	-> Well-to-Wheel
1. Stufe	Energieverbrauch	10.223.216 MJ	6.840.145 MJ	17.063.361 MJ
15 E-Busse	Vergleich Dieselbus	+6.859.258 MJ	-10.919.575 MJ	-4.060.317 MJ
<i>15 Solo-E-Busse</i>		+204 %	-61 %	-19 %
<i>15 Dieselbusse</i>	CO ₂ -e	165.011 kg	0 kg	165.011 kg
	Vergleich Dieselbus	-116.968 kg	-1.320.848 kg	-1.437.816 kg
		-41 %	-100 %	-90 %
	CO ₂ -e	23.927 €	0 €	23.927 €
	Vergleich Dieselbus	- 16.960 €	-191.523 €	-208.483 €
		-41 %	-100 %	-90 %
	CO: -943 kg / HC: -81 kg / NO _x : -4.579 kg, PM: -52 kg			
2. Stufe	Energieverbrauch	31.049.469 MJ	20.775.499 MJ	51.824.969 MJ
72 E-Busse	Vergleich Dieselbus	+20.754.243 MJ	-33.577.238 MJ	-12.822.995 MJ
<i>72 Solo-E-Busse</i>		+202 %	-62 %	-20 %
<i>68 Dieselbusse</i>	CO ₂ -e	503.002 kg	0 kg	503.002 kg
	Vergleich Dieselbus	-359.980 kg	-4.042.390 kg	-4.402.370 kg
		-42 %	-100 %	-90 %
	CO ₂ -e	72.935 €	0 €	72.935 €
	Vergleich Dieselbus	- 52.197 €	-586.147 €	-638.344 €
		-42 %	-100 %	-90 %
	CO: -2.885 kg / HC: -248 kg / NO _x : -14.013 kg, PM: -160 kg			
Gesamtflotte	Energieverbrauch	64.748.765 MJ	43.451.168 MJ	108.199.933 MJ
133 E-Busse	Vergleich Dieselbus	+40.640.551 MJ	-83.826.024 MJ	-43.185.473 MJ
<i>72 Solo-E-Busse</i>		+169 %	-66 %	-29 %
<i>61 Gelenk-E-Busse</i>	CO ₂ -e	1.299.380 kg	0 kg	1.299.380 kg
<i>120 Dieselbusse</i>	Vergleich Dieselbus	-721.455 kg	-9.466.020 kg	-10.187.475 kg
		-36 %	-100 %	-89 %
	CO ₂ -e	188.410 €	0 €	188.410 €
	Vergleich Dieselbus	- 104.611 €	-1.372.573 €	-1.477.184 €
		-36 %	-100 %	-89 %
	CO: -5.788 kg / HC: -498 kg / NO _x : -28.114 kg, PM: -321 kg			

Zusammenfassung

Untersuchung des Energieverbrauchs [MJ] in den Wirkungsketten:

- Well-to-Tank: Energieprozesse/indirekte Emissionen; Kraftstoffbereitstellung von Quelle zum Fahrzeugtank
- Tank-to-Wheel: Fahrzeugprozesse/direkte Emissionen; Endenergieverbrauch
- Well-to-Wheel: Energie- und Fahrzeugprozesse; Primärenergieverbrauch

CO₂-e (CO₂-Äquivalente):

- Masseinheit zur Vereinheitlichung der Klimawirkung der unterschiedlichen Treibhausgase
- Menge und Kosten der Schadstoffemissionen in kg und €

Vergleich Elektrobuss zum Dieselbus (Mehraufwand (+) / Ersparnis (-):

- Vergleich der Energiewerte und CO₂-Äquivalente des Elektrobusses zum Dieselbus
- Zusätzliche Betrachtung der lokalen Schadstoffemissionen von Kohlenstoffmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide (NO_x) und Feinstaub (PM), die beim Dieselbus in der Wirkungskette Tank-to-Wheel entstehen.

Stromkennzeichnung:

- Information über die Zusammensetzung des gelieferten Stromes
- In der Betrachtung verwendete Stromkennzeichnung: 53 % Erneuerbare Energien (gefördert nach EEG), 47 % Sonstige erneuerbare Energien

Berechnungsgrundlagen:

- Ermittlung Energieverbrauch und Menge an CO₂-Äquivalent auf Grundlage der DIN EN 16258 (2013)
- Monetarisierung der Emissionen und CO₂-Äquivalent-Ausstöße auf Basis der Verfahrensanleitung zur Standardisierten Bewertung von Verkehrsweginvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs

Betrachtungszeitraum: 1 Jahr

1 Hintergrund

1.1 Ausgangslage

Für das Erreichen der nationalen und internationalen Klimaschutzziele wird oft postuliert, dass eine Energiewende nur gelingen kann, wenn sie von einer Mobilitätswende begleitet wird. Der ÖPNV-Sektor nimmt als Mitglied des Umweltverbundes seit jeher eine Vorreiterrolle bei umwelt- und klimafreundlicher Mobilität ein. Schienengebundene öffentliche Verkehrsmittel sind schon lange zu einem erheblichen Anteil elektrisch angetrieben und damit zumindest lokal emissionsfrei unterwegs. Dadurch hat sich in der Branche im Zuge der neuen Entwicklungen in der Elektromobilität zunehmend der Anspruch etabliert, auch im Busbereich die verkehrsbedingten Emissionen durch eine Systemumstellung deutlich zu senken.

Da Oberhausen zu den Städten gehört, die seit Jahren den Grenzwert des Jahresmittelwertes für NO₂ überschreiten, möchte die STOAG mit der Ausweitung des Einsatzes von batterieelektrischen Bussen einen Beitrag zur Reduzierung der NO₂-Belastung leisten. Zudem wird davon ausgegangen, dass durch den geringeren spezifischen Energiebedarf der Elektrobusse die Energieeffizienz der Busflotte signifikant gesteigert werden kann.

In dieser Studie wird der Einsatz der batterieelektrischen Antriebstechnik im Busbereich betrachtet und für das Oberhausener Busliniennetz die Rahmen- und Einsatzbedingungen bewertet. Dies bildet die Grundlage für eine Systementscheidung und ein Umsetzungskonzept zur Ausweitung des Einsatzes von (lokal-) emissionsfreien Bussen in Oberhausen.

1.2 Grundannahmen

Die Projektbearbeitung erfolgt unter der Prämisse einiger Grundannahmen, die wesentlichen Einfluss auf den Bearbeitungsprozess und dessen Ergebnisse nehmen.

Hintergrund

Übergebene Unterlagen der STOAG werden vertraulich behandelt und nur für die Erstellung der Machbarkeitsstudie verwendet. Für die Bearbeitung wird ein prozessorientierter und praxisnaher Ansatz gewählt.

Die detaillierte Untersuchung umfasst neben der Abbildung der Umläufe auch die Energiebilanzierung im Betriebshof. Zudem werden betriebliche Aspekte, wie Anpassungen der Umläufe und der Prozesse auf dem Betriebshof untersucht. Die Kostenbetrachtung erfolgt nach dem Prinzip der Total Cost of Ownership, welche nicht nur direkte Kosten, wie Investitions-, Kapital- und Betriebskosten, sondern auch indirekte Kosten, wie CO₂-Vermeidungskosten, einbezieht.

Die Umweltbilanzierung erfolgt ebenso ganzheitlich und analysiert die Schadstoffemissionen von CO₂, NO_x und Partikeln inklusive der Kraftstoff- bzw. Energiebereitstellung.

Die derzeit am Markt verfügbaren Elektrobussysteme sind noch nicht geeignet, den derzeitigen konventionellen Busbetrieb vollständig gleichwertig abzubilden. Es sind Technologiesprünge bei Kosten und Reichweiten zu erwarten. Auch wegen der hohen Kosten und des erwarteten Markthochlaufs neuer Bussysteme wird von einem schrittweisen Umstieg auf neue Antriebskonzepte ausgegangen. Dies schließt einen zeitweisen Parallelbetrieb mit Dieselnissen ein.

1.1 Zielsetzung

Aufgabe der Machbarkeitsstudie ist es, exemplarisch den Elektrobusbetrieb im gesamten Liniennetz der STOAG abzubilden und ein für Oberhausen optimales Einsatzkonzept für den Elektrobuss zu entwickeln. Dieses soll dem bisherigen konventionellen Dieselnissbetrieb gegenübergestellt werden und als Entscheidungsgrundlage für künftige Busbeschaffungsmaßnahmen herangezogen werden.

Einen Überblick zum aktuellen Stand der Technik der Elektrobussystemkomponenten liefert die Grundlagen-Technologiebetrachtung, die der Machbarkeitsstudie vorangestellt wird.

Die generalisierte Abbildung des Oberhausener Busliniennetzes soll über geeignete Referenzszenarien, die gemeinsam mit der STOAG festzulegen sind, erfolgen. Je Referenzszenario sind Energiebedarfswerte zu ermitteln, die maßgebend für die Auslegung und Konfiguration des Elektrobussystems sind. Das herausgearbeitete optimale Elektrobussystem ist

hinsichtlich der für die Umstellung notwendigen Infrastrukturen, der erforderlichen betrieblichen Anpassungen sowie der damit verbundenen Investitionskosten zu bewerten. Neben einer Gesamtkostenanalyse sind zudem Reduktionspotenziale verkehrsbedingter Emissionen zu ermitteln.

Die Ergebnisse stellen die Grundlage für das auszuarbeitende Umsetzungskonzept zur schrittweisen Umstellung des STOAG-Busbetriebes auf elektrischen Antrieb, die Erstellung von standardisierten Lastenheften für zukünftige Fahrzeug- und Ladeinfrastruktur-Ausschreibungen sowie für die Integration der für die Energieplanung relevanten Funktionalitäten in die vorhandenen Planungssysteme der STOAG dar.

Die Untersuchungsergebnisse sollen sowohl die STOAG als auch die zuständigen politischen Entscheidungsträger in die Lage versetzen, über die Umsetzung des erarbeiteten Konzepts zu entscheiden und dessen Realisierung anschließend unmittelbar beginnen zu können.

1.3 Zielgruppen der Untersuchung

Primäre Zielgruppe des Projektes und der Projektergebnisse ist natürlich der Auftraggeber, die STOAG, vertreten zum einen durch die Geschäftsleitung, die für die Umsetzung strategischer Projekte und Maßnahmen verantwortlich ist. Zum anderen sind die Projektergebnisse aber auch für weitere Fach- und Führungskräfte von Bedeutung, etwa aus den Bereichen Fahr- und Dienstplanung, Einsatzplanung, Personaldisposition oder Werkstatt. Zudem sind die Erkenntnisse für die politischen Entscheidungsträger in der Stadt Oberhausen, Land und Bund relevant.

Wegen der strategischen Tragweite des Projektes erfolgt die Erstellung von Projektdokumenten unter dem Blickwinkel der möglichen Weitergabe an Dritte durch die Geschäftsführung der STOAG.

2 Vorgehensweise

2.1 Liniennetz- und Umlaufanalyse

In die Analyse des Liniennetzes bzw. der zugehörigen Umläufe werden im Wesentlichen folgende drei einsatzspezifische Faktoren einbezogen:

- ▶ Struktur des Liniennetzes
- ▶ Liniencharakteristik (Topographie, Geschwindigkeitsprofil und Haltestellenabstände der Linienwege)
- ▶ Verkehrliche Funktion und Verkehrsnachfrage der Linie

Struktur des Liniennetzes

Die Struktur des Liniennetzes umfasst die Linienverläufe (von/bis) der einzelnen Linien, deren Position innerhalb des Liniennetzes und zueinander sowie parallele Linienverläufe. Auch die Lage von Linienendpunkten, von wichtigen Umsteigepunkten oder die Lage von Betriebsstätten (insbesondere Betriebshöfen) werden einbezogen. Im Liniennetz sind mögliche Potenziale, die für die Ausgestaltung des Elektrobuseinsatzes relevant sein könnten, aufzuzeigen. Die Potenzialermittlung ist insbesondere für die Integration des Opportunity Chargers (Gelegenheitslader) von Bedeutung. Diese Ladestrategie erfordert, entsprechend betrieblich-technischer Erfordernisse, die optimale Festlegung der Ladestandorte und zugehöriger Ladeinfrastruktur im Netz. Für die Gelegenheitsladung bieten sich vor allem Linienendpunkte oder Haltestellen mit längeren Aufenthaltszeiten an, idealerweise solche, die von mehreren Linien bedient werden. Hierdurch können bei der Entscheidung für bspw. ein Docking-Station-System die Nachlade-Haltestellen durch mehrere Linien genutzt werden.

Liniencharakteristik

Im Zuge einer detaillierteren Charakterisierung der Linien, werden Informationen zu den exakten Längen der Linienwege, zur Topographie, zu den Haltestellenabständen und zum Geschwindigkeitsprofil gewonnen. Auf dieser Basis kann eine erste Bewertung hinsichtlich der Eignung der betrachteten Antriebstechnologie im Anwendungsfall getroffen werden.

Verkehrliche Funktion und Verkehrsnachfrage der Linie

Nicht zuletzt sind die einzelnen Linien des Liniennetzes bezüglich ihrer verkehrlichen Funktion und ihrer Verkehrsnachfrage zu bewerten. Dies ist aus zwei zentralen Gründen wichtig: Infrastrukturkosten für die Gelegenheitsladung können auf stark ausgelasteten und mithin energieintensiven Strecken besser auf viele Fahrzeuge verteilt werden. Gleichzeitig ist zu beachten, dass hohe Anforderungen an die Beförderungskapazität den Spielraum für das Gewicht (und die Größe) der mitgeführten Energiespeichermedien reduzieren. Aus wirtschaftlicher Sicht ist es sinnvoll, neue und mit hohen Investitionskosten einhergehende Technologien auf hoch ausgelasteten und entsprechend ertragreichen Linien mit sehr engen Taktzeiten einzusetzen.

Da in aller Regel nicht davon auszugehen ist, dass ein städtisches Bussystem in kurzer Zeit vollständig umgestellt wird, sondern vielmehr eine sukzessive Erschließung über einen längeren Zeitraum erfolgt, ist gerade bei der Auswahl der ersten umzustellenden Linien und der gegebenenfalls notwendigen Standorte für Ladestationen auf Synergieeffekte für weitere Linien zu achten.

Die Analyse des städtischen Busnetzes erfolgt unter Beachtung des beschriebenen Vorgehens in Absprache mit der STOAG. Die enge Kooperation mit dem Betreiber ist essentiell, um dessen betriebliche Erfahrungswerte, strategische Aspekte der örtlichen Verkehrssystementwicklung und ggf. lokale Besonderheiten in die Ausgestaltung des Elektrobussystems einfließen zu lassen und ein umsetzungsreifes Konzept zu erhalten.

2.2 Datenerfassung und Evaluation

Sowohl für die Liniennetzanalyse als auch insbesondere für die Detailuntersuchung der ausgewählten Umläufe werden umfangreiche und detaillierte Daten erfasst und ausgewertet.

Die in die Analyse einbezogenen Daten lassen sich grob in folgende Kategorien unterteilen:

- ▶ Liniendaten (Linienverläufe, Liniennetz- und Linienpläne, topographische Linieninformationen)
- ▶ Planungsdaten (Fahr- und Umlaufpläne, Kurskarten)

Vorgehensweise

Über eine standardisierte Eingabemaske des Systems BeSystO[®] werden weitere betriebliche Parameter aus folgenden Bereichen erfasst:

- ▶ Fahrleistungen (Kilometerleistung, Einsatzzeiten)
- ▶ Durchschnittliche Besetzungsgrade (zeitlich gestaffelt)
- ▶ Durchschnittliche Verspätungslagen (zeitlich gestaffelt)
- ▶ Ausstattungsmerkmale Dieselfahrzeug (Referenzfahrzeug)
- ▶ Ausstattungsmerkmale Elektrobus (Planfahrzeug)
- ▶ Klimafaktoren
- ▶ Energieinfrastruktur Strecke und Betriebshof
- ▶ Betriebliche Parameter Betriebshof (Abläufe, Zeiten, Services)
- ▶ Geplante Werkstattausrüstung
- ▶ Geplante Personalqualifizierung

2.3 Detailuntersuchung eines Umlaufs

Für die Detailuntersuchung der ausgewählten Umläufe wird das von der VCDB entwickelte Tool BeSystO[®] (Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV) eingesetzt.

Für die technische Machbarkeitsuntersuchung kommt das Modul BeSystO[®]-SOC zum Einsatz; die Wirtschaftlichkeits- und Ökologiebetrachtungen erfolgen im Modul BeSystO[®]-TCO (TCO steht für „Total Cost of Ownership“).

In BeSystO[®] erfolgt die Simulation eines typischen Betriebstages inklusive aller Einflussfaktoren (Streckentopographie, Verspätungslagen, Zuladung, Einsatz Heizung und Klimatisierung, Prozesse im Betriebshof, Linien- und Dienstfahrten) als Worst-Case-Betrachtung. Grundlage dieser Herangehensweise ist der Anspruch, dass das neu auszulegende System in der Lage sein muss, den ungünstigsten Betriebsfall abbilden zu können.

Die Besonderheit von BeSystO[®] ist die dynamische Verknüpfung aller Eingangsdaten und Rechenoperationen, so dass sich alle Änderungen von einzelnen Parametern sofort im Ergebnis darstellen. Dadurch ist es möglich, sich in iterativer Vorgehensweise dem für den jeweiligen Anwendungsfall geeigneten Optimum zu nähern.

Die Detailuntersuchung erfolgt nach folgendem Vorgehen:

- ▶ Integration evaluierter Unternehmensdaten
 - ▶▶ Importieren der Evaluationsergebnisse in BeSystO[®]

Vorgehensweise

- ▶ Aufbereitung der Umlaufdaten
 - ▶▶ Analyse, Linienzuordnung
 - ▶▶ Einfügen in BeSystO®

Die durch den Verkehrsbetrieb übermittelten Dokumente bzw. Datensätze werden auf Relevanz und Linienbezug überprüft.

- ▶ Integration Streckendaten
 - ▶▶ Eingabe von Endhaltestellen (Linienend- und -wechselpunkte)
 - ▶▶ Einfügen weiterer Haltestellen, die mögliche Standorte für die Unterwegsladung darstellen

Definierte End- und Unterwegshaltestellen fungieren als „Ankerpunkte“ bei der Energiebilanzierung für den Tagesverlauf. Weiterhin markieren sie die Position für die mögliche punktuelle Nachladung.

- ▶ Bewertung der Trassierung
 - ▶▶ Berechnung der Einstufung SORT (Stopps/km, Haltezeitanteil, Durchschnittsgeschwindigkeit)
 - ▶▶ Berechnung der Einstufung TOPO (Höhenprofil, maximale Steigung und Gefälle)

Die Einstufungskriterien zu SORT und TOPO sind in den nachfolgenden Tabellen dargestellt.

Vorgehensweise

Einstufung	Bezeichnung	Stopps je Kilometer	Haltezeitan- teil	Durch- schnitts- geschwin- digkeit
SORT 1	Schwerer Stadtverkehr	> 6	> 40 %	< 14 km/h
SORT 2	Leichter Stadtverkehr	2 – 6	20 % – 40 %	14 – 20 km/h
SORT 3	Vorstadtverkehr	< 2	< 20 %	> 20 km/h

Tabelle 2.1: Einstufungskriterien SORT

Einstufung	Bezeichnung	Höhendifferenz	max. Steigung
TOPO 1	Schwere Topographie/ Bergland	> 100 m	> 7%
TOPO 2	Leichte Topographie/ hügelig	50 – 100 m	3 – 7 %
TOPO 3	Flachland	< 50 m	< 3 %

Tabelle 2.2: Einstufungskriterien TOPO

Es erfolgt eine Kategorisierung in eine von drei Einstufungen SORT (angelehnt an die „Standardised On-Road Test cycles“ der UITP zur Bewertung von Fahrtverläufen) und TOPO (topographische Bewertung des Linienwegs auf Basis der genannten Parameter). Die SORT- und TOPO-Einstufung führt zu Beaufschlagungen in der Energiebilanzierung.

- ▶ Definition Nachladung „Strecke“
 - ▶▶ Berechnung geeigneter Haltestellen für Nachladung (Anzahl Stopps, Summe Wendezeiten, potenzielle Ladezeit pro Halt)
 - ▶▶ Festlegung Ladepunkte und Ladeleistung

Bei der Technologieoption Gelegenheitslader wird davon ausgegangen, dass eine vollständige Ladung der Traktionsenergiespeicher auf der Strecke nicht ausreichend bzw. wirtschaftlich ist. Es sind also unabhängig vom Ladekonzept Ladegeräte auf dem Betriebshof notwendig.

Vorgehensweise

- ▶ Definition Nachladung „Betriebshof“
 - ▶▶ Ermittlung der Grundlagen für die Energiebereitstellung am Betriebshof (insbesondere maximale Anschlussleistung)
 - ▶▶ Energetische Bewertung der fahrzeugbezogenen Prozesse im Betriebshof
 - ▶▶ Festlegung der Ladetechnologie und -leistung

Während der nächtlichen Betriebspause werden die Traktionsenergiespeicher der Elektrobusse bis zur zulässigen Obergrenze (SOC_{max}) aufgeladen. Dabei sind zwei Arten der Energiezuführung denkbar, unabhängig davon, ob die Technologieoption Gelegenheitslader gewählt wird:

- ▶ Zum einen ein Plug-In-System mit standardisierter Ladekupplung, welches auch bei Bussen mit Pantographen für die Unterwegsladung stets als Rückfallebene vorgesehen werden sollte.
- ▶ Zum anderen ein Docking-Station-System mit Pantographen (entweder auf dem Fahrzeug oder infrastrukturseitig verbaut), welche auch bei reiner Depotladung Vorteile im Handling des Systems haben.

Die Abstellung ist entsprechend auszurüsten. Sowohl zur Vermeidung von Spitzenlasten und Kosten als auch zur Schonung der Speicher und des fahrzeugseitigen Übertragungssystems erfolgt die Übernachtsladung mit im Vergleich zur möglichen Unterwegsladung geringer Leistung.

Es erfolgt zunächst eine Konfiguration des Fahrzeugs hinsichtlich Größe, Antrieb und Heizung/Klimatisierung, aus der sich der Energiebedarf errechnet. Die Traktionsenergiespeicher werden hier noch nicht berücksichtigt. Es wird immer davon ausgegangen, dass das zulässige (bzw. aufgelastete) Gesamtgewicht erreicht wird (Worst-Case-Betrachtung). Darin muss das Gewicht der Speicher zwingend enthalten sein.

- ▶ Konfiguration Traktionsenergiespeicher
 - ▶▶ Auswahl Speicherart und -technologie (beeinflusst den nutzbaren SOC)
 - ▶▶ Festlegung der Auslegungsgröße des Traktionsenergiespeichers (beeinflusst die Reichweite und die Fahrgastkapazität)
 - ▶▶ Ausweisung SOC_{min} und SOC_{max} als nutzbarer Speicherinhalt sowie Festlegung einer Energiereserve

Bei der Speicherauslegung ist neben dem erwarteten Energiebedarf pro Betriebstag insbesondere auch die aus dem Speicher abrufbare Leistung zu berücksichtigen. Um eine vorzeitige Alterung und Kapazitätseinbußen der

Vorgehensweise

Speicher zu vermeiden, muss weiterhin beachtet werden, dass in Abhängigkeit von der gewählten Speichertechnologie immer nur ein begrenzter Ladebereich (SOC = State of Charge) genutzt werden darf. Der nutzbare Bereich des Energiespeichers wird durch den minimalen Ladezustand (SOC_{min}) und den maximal zulässigen Ladezustand (SOC_{max}) begrenzt. Zusätzlich wird eine Energiereserve festgelegt, die während des Betriebstages verfügbar bleiben soll, damit das Fahrzeug aus jedem Punkt des Einsatzgebietes den Betriebshof im Havariefall ohne Unterwegsladung erreichen kann.

- ▶ Berechnung Energiebedarf pro Tag
 - ▶▶ Berechnung des SOC-Verlaufs für den betrachteten Umlauf
 - ▶▶ Ausweisung der SOC-Diagramme (Verlaufskurve)

In Zusammenführung aller Daten und Berechnungsergebnisse wird für jeden betrachteten Umlauf eine Ladezustandsverlaufskurve des Energiespeichers ausgewiesen. Ob sich der ausgewählte Umlauf mit der aktuellen Systemauslegung abbilden lässt, erkennt man daran, ob die SOC-Verlaufskurve bis zum Einrückzeitpunkt am Betriebshof nicht unter den Wert SOC_{min} bzw. die Markierung für die Energiereserve sinkt (auf der Einrückfahrt kann ein Absinken unter die Reserve-Markierung jedoch toleriert werden). Die Energiereserve stellt die Energiemenge dar, welche benötigt wird, um vom weitest entfernten Punkt auf dem Linienweg sicher zum Betriebshof zurückkehren zu können.

2.4 Energiebilanzierung und Systemauslegung

Die Ermittlung der für den Antrieb notwendigen Energie setzt sich aus der Berechnung des Energiebedarfes für das leere Fahrzeug sowie des zusätzlichen Bedarfs aus der gemittelten Zuladung (Fahrgäste) im Tagesverlauf zusammen. Der Energiebedarf der Nebenverbraucher wird gesondert bewertet. Die Nebenverbraucher werden entsprechend dem notwendigen technischen Bedarf, wie Druckluft, Leistung Lenkunterstützung, Verbraucher für Fahrgastraum, Sicherheitsfunktionen für den Fahrer, Betriebssicherheit des Fahrzeuges usw. bestimmt.

Zusätzliche Nebenverbraucher für gehobene Beförderungsqualität wie Klimatisierung, Heizung und Lüftung werden gemäß den Vorgaben des Verkehrsunternehmens konfiguriert.

2.5 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen erfolgen in dem BeSystO[®]-Modul TCO. Dabei werden alle technischen und betrieblichen Parameter wie auch die Untersuchungsergebnisse aus der technischen Machbarkeitsuntersuchung und der Energiebilanzierung in BeSystO[®]-SOC übernommen. Auch nachträgliche Änderungen, beispielsweise in der Systemkonfiguration und -auslegung werden dynamisch in die Wirtschaftlichkeitsanalysen integriert.

Für die wirtschaftliche Betrachtung der zu untersuchenden Linie wird eine betriebswirtschaftliche Gesamtkostenbetrachtung durchgeführt. Diese erfolgt auf Basis der Kapitalwertmethode. Es fließen sämtliche Investitionskosten und die erforderliche Erneuerung der Traktionsenergiespeicher in bestimmten Intervallen unter Berücksichtigung der Kosten für die Kapitalverzinsung ein. Hierzu existiert in BeSystO[®] eine entsprechende Datenbank, die auf der Grundlage kontinuierlicher Marktbeobachtung durch Projektdaten und Herstellerinterviews regelmäßig aktualisiert wird. Weiterhin werden sämtliche Betriebskosten in Relation zur Laufleistung in die Betrachtung integriert.

Da es sich um eine langjährige Vorausschau handelt, in deren Bezugszeitraum teilweise nicht oder nur schwer vorherzusagende Entwicklungen stattfinden, erfolgt die Berechnung in verschiedenen Szenarien. In diesen Szenarien sind jeweils bestimmte Preisentwicklungsmodelle für Dieseldieselfkraftstoff, elektrischen Strom und Energiespeichermedien hinterlegt.

Schließlich werden für jede untersuchte Technologieoption die laufleistungsbezogenen Mehrkosten gegenüber dem Referenzsystem (Dieselbus, Ohnefall) ausgewiesen.

Im Einzelnen werden für die Systemkosten (Investitionskosten) die folgenden Kostenpositionen in der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung berücksichtigt:

- ▶ Fahrzeug
 - ▶▶ Grundfahrzeug (reduziert um Traktionskomponenten Diesel)
 - ▶▶ Traktionsausrüstung Elektro
 - ▶▶ Nebenaggregate
 - ▶▶ Fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur
 - ▶▶ Energiespeicher
- ▶ Ladeinfrastruktur Strecke und Betriebshof (inklusive Bau- und Errichtungskosten, Planungs- und Baunebenkosten)

Vorgehensweise

- » Übertragungssystem
- » Energiebereitstellung
- » Leitungswege
- ▶ Werkstattausrüstung
 - » Dacharbeitsstände, Arbeitsbühnen
 - » Flurfördergeräte und Kräne (stationär/mobil)
 - » Hochvolt-Spezialwerkzeug
 - » Prüf- und Messgeräte
 - » Persönliche Schutzausrüstung für Mitarbeiter

Zusätzlich werden die Personalaufwendungen für die Erstqualifizierung von Mitarbeitern in Fahrdienst und Werkstatt für die Arbeit an und mit Elektrobussen sowie Personalkosten für das Projektmanagement als Einmalkosten in die Betrachtung einbezogen.

Für die Gegenüberstellung der untersuchten Technologieoption mit dem Ohnefall, also dem Dieselbusbetrieb, werden neben den abgezinsten Investitionskosten auch die laufleistungsbezogenen Betriebskosten integriert. Diese umfassen folgende Kategorien:

- ▶ Laufleistungsparameter (gemäß Ermittlung in BeSystO[®]-SOC)
 - » Jahreskilometerleistung (pro Fahrzeug und Jahr)
 - » Jahresbetriebsdauer (pro Fahrzeug und Jahr)
- ▶ Verbrauchswerte pro km
 - » Referenzfahrzeug (Diesel, Heizöl, AdBlue)
 - » Elektrofahrzeug (elektrischer Strom)
- ▶ Energiekosten
 - » Einkaufspreise für Diesel, Heizöl und AdBlue
 - » Einkaufspreise für Strom unter Berücksichtigung der aktuellen Rechtslage für Elektrobusse (Gleichsetzung mit Straßenbahn bei Stromsteuer)
- ▶ Personalkosten
 - » Fahrdienstpersonal
 - » Werkstattpersonal (Instandhaltungsmehraufwand, sofern definiert)
- ▶ Fahrzeugreserve¹
 - » Aufwand für erhöhte Reservevorhaltung aufgrund der neuen Technologie

¹ **Hinweis** | Die Fahrzeugreserve ist in der betrachteten Fahrzeuganzahl enthalten und wird nicht mit extra Kosten belegt.

Vorgehensweise

» Gestaffelt nach Betriebsjahr 1 bis 2 und Folgejahre

Da in der Betrachtung der elektromobilen Technologieoptionen die Einrichtungen zur Energieversorgung, also die Ladeinfrastruktur über die Investitionskosten voll in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einfließen, muss auch die Nutzung einer eigenen Tankstelle kostenseitig mit betrachtet werden. Hier wurde ein Pauschalwert angesetzt, der die Abschreibungskosten sowie die Unterhaltungsaufwendungen für die Einrichtungen zur Kraftstoffversorgung abbildet.

Schließlich wird die Darstellung der Mehrkosten noch um ein Förderszenario ergänzt. Aufgrund der Vielzahl möglicher Förderprogramme auf den verschiedenen administrativen Ebenen wird in Abstimmung mit dem Verkehrsunternehmen ein Standardfördersatz gewählt, der aktuell üblicherweise in Vorhaben zur Elektromobilität erzielt werden kann. Dieser wird spezifisch für die systembezogenen Fahrzeugmehrkosten (inkl. Energiespeicher) sowie für die Anschaffung der für den Elektrobusbetrieb notwendigen Ladeinfrastruktur herangezogen.

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch den typischen Verlauf der Jahresmehrkosten eines Elektrobussystems gegenüber dem konventionellen Dieselduseinsatz über einen Betrachtungszeitraum von 16 Jahren.

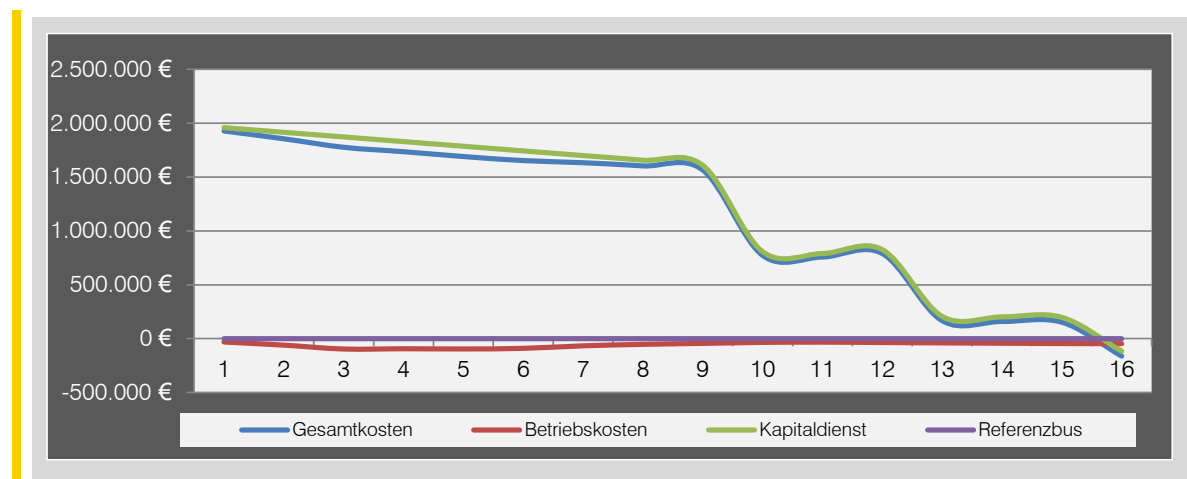


Abbildung 2.1: Verlaufskurve Jahresmehrkosten (Lesebeispiel)

Das Diagramm zeigt über die einzelnen Jahre (Abszisse) die Jahresmehr- bzw. -minderkosten für das gesamte betrachtete System (Ordinate) gegenüber dem Referenzwert des Dieselduseinsatzes. Die Gesamtkosten summieren sich aus den Betriebskosten und den Kosten für den

Vorgehensweise

Kapitaldienst der getätigten Investitionen (Fahrzeugmehrkosten, Infrastrukturkosten, sonstige Einmalkosten wie Weiterbildungsmaßnahmen etc.).

Im gezeigten Beispiel erkennt man deutlich die erheblichen jährlichen Mehrkosten zu Beginn des Betrachtungszeitraums. Sie werden durch die Fahrzeugmehrkosten und die getätigten Investitionen, insbesondere in Ladeinfrastruktur, hervorgerufen. Im achten Betrachtungsjahr erzeugt die fällige Speichererneuerung einen leichten Anstieg der Mehrkosten, gefolgt von einem deutlichen Abfallen aufgrund des abgelaufenen Abschreibungszeitraums des Elektrobusses. Der Restwert der Dieselbusse erzeugt bei deren Aussonderung im zwölften Betriebsjahr erneut einen leichten relativen Anstieg der Systemmehrkosten des Elektrobusses, unmittelbar gefolgt von einem starken Absinken bedingt durch die Ersatzbeschaffung der Diesel Fahrzeuge. Schließlich pendeln sich die Mehrkosten auf einem relativ niedrigen Niveau ein und sinken im 16. Betriebsjahr unter das Niveau des Dieselbusses. Die Betriebskosten des untersuchten Elektrobusses liegen zunächst leicht unterhalb des Diesel-Referenzsystems, erreichen jedoch im Laufe der ersten 10 Jahre dessen Niveau, unter anderem aufgrund eines prognostizierten Preisanstiegs bei elektrischer Energie.

Das Beispiel zeigt ein mittleres Kostenentwicklungsszenario, wobei Fördermittel nicht eingerechnet wurden. Die Hinzunahme einer Förderung auf Fahrzeugmehrkosten und systemspezifische Infrastrukturen würde den Zeitpunkt der Systemrentabilität, also des Absinkens der Gesamtkostenkurve unter das Diesel-Referenzsystem, zeitlich nach vorne verlagern.

2.6 Ausweisung ökologischer Parameter

Ein zentrales Motiv für Untersuchungen zur Umstellung von fossil betriebenen Bussystemen auf Elektrobussysteme sind ökologische Effekte.

BeSystO® liefert eine lauleistungsbezogene CO₂-Bilanzierung als Vergleichsdarstellung zwischen einem konventionell betriebenen Referenzbus (Dieselbus) auf der einen und dem Elektrobuss mit verschiedenen Strommischen (lokaler Erzeuger, bundesdeutscher Durchschnitt aktuell / Prognose 2020, Ökostrom) auf der anderen Seite.

Die Energieverbräuche werden in folgende Wirkungsketten differenziert:

- ▶ Well-to-Wheel in Zusammenführung der Teilketten
 - ▶▶ Well-to-Tank (Brunnen-zu-Tank) und
 - ▶▶ Tank-to-Wheel (Tank-zu-Rad).

Vorgehensweise

Bei allen Betrachtungen werden der Energieverbrauch und die Menge an CO₂-Äquivalent auf Grundlage der DIN EN 16258 (2013) sowie die Kosten der CO₂-Äquivalent-Ausstöße nach der Standardisierten Bewertung dargestellt. Die Energieketten des Referenzbusses und des Elektrobusses werden für den ausgewählten Umlauf auf Grundlage der ermittelten Energiewerte verglichen.

Für den Referenzbus werden zusätzlich die lokalen Schadstoffemissionen von Stickoxiden NO_x, Feinstaub (PM), Kohlenmonoxid CO und Kohlenwasserstoffen HC mengenmäßig ermittelt und dargestellt. Diese werden direkt im Straßenverkehr lokal emittiert und fließen daher ausschließlich in die Tank-to-Wheel-Betrachtung ein. Die Mischung des Fuhrparks und die Euro-Abgasnorm der Verbrennungsmotoren können dabei entsprechend der Vorgaben des Verkehrsunternehmens berücksichtigt werden.

Abschließend erfolgt die Monetarisierung der Emissionen auf Basis der Verfahrensanleitung zur Standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs und die Berechnung der Treibhausgas-Vermeidungskosten aus der Differenz von Technologiezusatzkosten und eingesparten Energiekosten im Verhältnis zur erzielten Reduktion des Ausstoßes von CO₂-Äquivalenten (EUR/t CO₂-e).

3 Untersuchungsbasis

Gemeinsam mit der STOAG wurden alle für die Konfiguration und Auslegung des Elektrobussystems relevanten Daten ermittelt. Im Eingangsdatenblatt, vgl. Anhang 12, ist die untersuchungsrelevante Datenbasis aufgeführt. Zudem wurden weitere notwendige Planunterlagen und Plandokumente durch die STOAG zur Verfügung gestellt.

3.1 Fahrzeugkonfiguration

Im Dialog mit der STOAG wurde die Fahrzeugkonfiguration für den Elektrobus vorgenommen. Für die bei der STOAG im Einsatz befindlichen Fahrzeuggrößen wurden dabei folgende Anforderungsparameter definiert.

- ▶ Solobus
 - ▶▶ 12 m
 - ▶▶ 2-türig (N) und 3-türig (3)
 - ▶▶ 19,5 t zulässiges Gesamtgewicht
 - ▶▶ 90 Plätze; wenn möglich; ggf. geringere Platzkapazität zulässig
- ▶ Gelenkbus
 - ▶▶ 18 m
 - ▶▶ 3-türig
 - ▶▶ 28 t zulässiges Gesamtgewicht
 - ▶▶ 130 Plätze; wenn möglich; ggf. geringere Platzkapazität zulässig
- ▶ Solo- und Gelenkbus
 - ▶▶ Elektrisches Heizungskonzept: Wärmepumpe; keine fossile Zusatzheizung

3.2 Kosten

Die Abschreibung wird sowohl für das Referenz- als auch das Elektrofahrzeug linear über 10 Jahre vorgenommen. Für den Dieselbus und Elektrobus wird eine Einsatzzeit von 12 Jahren angenommen.

Als Energiekosten werden für das Referenzfahrzeug 0,95 EUR/l Diesel bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 36,0 l/100 km für den Solobus und

48,0 l/100 km angenommen. Hinzu kommen 0,18 EUR/l Harnstofflösung (AdBlue) für die Abgasreinigung der Euro-VI-Motoren. Die Nutzung der Tankstelle wird mit 0,04 EUR/l berücksichtigt. Für die Ladung des Elektrobusses werden 0,210 EUR/kWh an Stromkosten und ein Strommix, vollständig aus erneuerbaren Energiequellen (EEG-gefördert und sonstige), angesetzt.

Für die Instandhaltung der Referenzflotte werden durchschnittlich 0,52 EUR/km je Fahrzeug angenommen. Die Kosten (netto) für das Fahrpersonal betragen 33,14 EUR/h.

3.3 Betriebliche Rahmenbedingungen

Folgende durch die STOAG zur Verfügung gestellten Dokumente werden in der Untersuchung als Datenbasis herangezogen. Aus diesen Daten können die in den folgenden Abschnitten dargelegten linien- und umlaufspezifischen Informationen generiert werden.

- ▶ „Umlaufdaten_Beispielwoche_19Okt_2019-11-18“
- ▶ „Export_Lio_Elektrifizierung_2019-11-19“
- ▶ Kurskarten TA 11 - TA 15 (Fahrplan gültig ab 09.06.2019)
- ▶ Fahrzeugbedarf (Stand Januar 2020)

3.3.1 Linienbetrieb

Linienkennzeichnung

Im Busliniennetz der STOAG werden 64 Linien betrieben, davon 7 Schnellbuslinien (SB), 10 NachtExpress-Linien und 25 E-Wagen. Die restlichen 22 Linien tragen keine gesonderte Bezeichnung.

Die Schnellbuslinien sind dem Nummernbereich 090 - 098 (SB90 - SB98), die NachtExpress-Linien dem Bereich 001 - 021 (NE1 - NE21) bzw. 080 (NE10) und die E-Wagen dem Bereich 401 - 440 (E-401 - E-440) zugeordnet.

Einsatzzeit

Das Tagesliniennetz wird bis ca. 23 Uhr betrieben. Danach verkehren NachtExpress-Linien – wochentags bis 1 Uhr nachts und am Wochenende die ganze Nacht.

Untersuchungsbasis

Die Hauptlinien verkehren meist im 20-min-Takt, ergänzende Linien im 30-min- oder 60-min-Takt.

In der Untersuchung wird die Tagesart Montag - Donnerstag (MoDo) als Bezugstag herangezogen.

Fremd- und Subunternehmen

Einige Linien werden teilweise von Fremdunternehmen gefahren. Diese Gemeinschaftslinien verkehren meist in eine benachbarte Stadt (vgl. Tabelle 3.1). Direkte Nachbarstädte Oberhausens sind Dinslaken, Duisburg, Mülheim (Ruhr), Essen und Bottrop.

Fremdunternehmen	Linien	Anzahl Umläufe MoDo
Duisburger Verkehrsgesellschaft AG	907, 908, 935, 939	19
Ruhrbahn Essen	NE11, 143, 185	18
Ruhrbahn Mülheim	NE10, 122, 136	7
Vestische Straßenbahnen GmbH	Gemeinschaftslinien: NE21, SB91, 979 Nur Vestische: 263 ² ,	15
Busverkehr Rheinland GmbH ³	995	1

Tabelle 3.1: Fremdunternehmen mit Linien und Umläufen (MoDo)

Die Linien im Nummernbereich 950 - 980 werden vorwiegend von der STOAG bzw. deren Subunternehmer (siehe Tabelle 3.2) gefahren. Ausnahme ist die Linie 979, die in Kooperation mit der Vestischen und vier Elektrobussen betrieben wird.

² **Hinweis** | Die Linie 263 wird konzessionsrechtlich allein von der Vestischen Straßenbahnen GmbH betrieben.

³ **Hinweis** | Es besteht kein direktes Geschäftsverhältnis als Subunternehmer. Jedoch fährt Busverkehr Rheinland GmbH im Ringtausch mit der DVG für die STOAG im Rahmen des Naturalausgleichs.

Untersuchungsbasis

Subunternehmen	Linien	Anzahl Umläufe MoDo
Franz Urban GmbH	NE3, NE4, NE7, NE10, 407, 409, 410, 412, 422, 423, 427, 432, 957	16
Wohlgemuth Busbetrieb GmbH	NE1, SB90, SB97, 122, 143, 952, 953, 961,	14

Tabelle 3.2: Subunternehmen mit Linien und Umläufen (MoDo)

Von der STOAG, den Fremdunternehmen und den Subunternehmen werden in der zu betrachtenden Tagesart Montag - Donnerstag (MoDo) 188 Umläufe gefahren. Am Freitag sind es 191, samstags 126 und sonntag und feiertags 92 Umläufe.

Fahrzeugtypen

Zur Bedienung dieser Umläufe werden von der STOAG 120 Busse eingesetzt. Die Zuordnung zu den verschiedenen Fahrzeugtypen ist in Tabelle 3.3 angegeben.

Fahrzeugtyp	Abkürzung	Anzahl Fahrzeuge
GN Gelenk-Niederflur-KOM	G	52
NL Niederflur-Linien-KOM	N	34
NL-3T Niederflur-Linien-KOM 3-türig	3	28
Hybrid	3	2
Elektro	EBU	4
Summe		120

Tabelle 3.3: Anzahl der Busse nach Fahrzeugtyp

Das Subunternehmen Wohlgemuth Busbetrieb GmbH nutzt Fahrzeuge der STOAG, wohingegen die Franz Urban GmbH eigene Fahrzeuge besitzt.

Untersuchungsbasis

Linienverknüpfungen

Einige Linien sind miteinander verknüpft, sodass an einer Endhaltestelle mit oder ohne Wendezeit von einer Linie auf eine andere gewechselt wird. Folgende Linienverknüpfungen sind von besonderer Bedeutung und folglich auch für den Elektrobusbetrieb bindend: SB92/SB93/SB98; 953/961; SB97/952; NE4/NE7. Das Aufrechterhalten aller weiteren Linienverknüpfungen sollte angestrebt werden, ist jedoch nicht zwingend erforderlich.

Die Linien SB92, SB93 und SB98 sind an der Haltestelle Fröbelplatz, sowie die Linien SB92 und SB98 an der Haltestelle Falkestraße miteinander verknüpft. Die Linien 953 und 961 sind sowohl an der Haltestelle Spechtstraße als auch an der Haltestelle Wehrstraße verknüpft. Die Linien SB97 und 952 sind der Haltestelle Sterkrade Bahnhof und die Linien NE4 und NE7 an der Haltestelle Heinrich-Böll-Gesamtschule miteinander verknüpft.

Endhaltestellen

Innerhalb des Stadtgebietes existieren mehrere Endhaltestellen, an denen mehr als eine Linie endet. Diese sind in Tabelle 3.4 aufgeführt

Endhaltestelle	Linien
Falkestr.	SB92, SB98, 976
Spechtstr.	953, 961
Bahnhof OB-Sterkrade	STOAG-/Gemeinschaftslinien: SB97, 908, 935, 952, 954, 957, 962, 979 Linie Fremdunternehmen: 263
OB Hauptbahnhof	935 ⁴ , 955 ⁴ , 966
Wehrstr.	STOAG-/Gemeinschaftslinien: 953, 956, 961 Linie Fremdunternehmen: 124
Dümpfen	960, 976 ⁵
Anne-Frank-Realschule	STOAG-/Gemeinschaftslinien: SB97, 136, 935, 939, 955 Linie Fremdunternehmen: 995 ⁶
Fröbelplatz	SB92, SB93, SB98, 143

⁴ Nur in der Spätverkehrszeit und sonntags

⁵ Nur einzelne Fahrten und sonntags

⁶ Linie 995: Siehe dazu den Hinweis zu Fremd- und Subunternehmen

Untersuchungsbasis

Endhaltestelle	Linien
Ruhrpark	STOAG-/Gemeinschaftslinien: SB90 Linie Fremdunternehmen: 128
Holten Bf.	STOAG-/Gemeinschaftslinien: 960, 907 Linie Fremdunternehmen: 918

Tabelle 3.4: Endhaltestellen, bedient durch mehrere Linien

Die aufgeführten Endpunkte werden als potentielle Ladepunkte (LP) herangezogen, zusätzlich wird gemäß Absprache mit der STOAG der Endpunkt Holten Bf. Betrachtet.

Für den Busbetrieb von zentraler Bedeutung sind die Stadtteilzentren in den Bereichen Hauptbahnhof, Neue Mitte, Osterfeld und Sterkrade.

Elektrobuslinien

Schon heute werden in Oberhausen drei Linien (962, 966, 979) durch Elektrobusse betrieben. Die Linie 979 wird dabei in Kooperation mit der Vestischen betrieben. Zum Nachladen der Elektrobusse stehen zwei Ladestationen im Stadtgebiet zur Verfügung. Die Ladestation am Neumarkt wird von einem Gleichrichterunterwerk der Straßenbahn und die Ladestation am Bahnhof Sterkrade aus der Fahrleitungsanlage der Straßenbahn versorgt.

3.3.2 Analyse der Umlaufdaten

Die Umlaufliste beinhaltet spezifische umlaufbezogene Angaben. Für die Untersuchung von wesentlicher Bedeutung sind hier beispielsweise die Länge, die Dauer und die Wendezeit der Umläufe.

Umlauflängen

Das in Abbildung 3.1 dargestellte Histogramm gibt Auskunft über die Häufigkeitsverteilung der Umläufe entsprechend ihrer Umlauflängen in der Tagesart MoDo. Die Klasseneinteilung der Umlauflängen beträgt 25 km.

Es ist zu erkennen, dass mit einer Spanne von ca. 25 km bis ca. 375 km die Längen der insgesamt 188 Umläufe stark differieren. Die durchschnittliche Umlauflänge beträgt 212 km. Circa 36 % der Umläufe sind kürzer als

Untersuchungsbasis

200 km; entsprechend sind 64 % der Umläufe zwischen 200 km und 375 km lang.

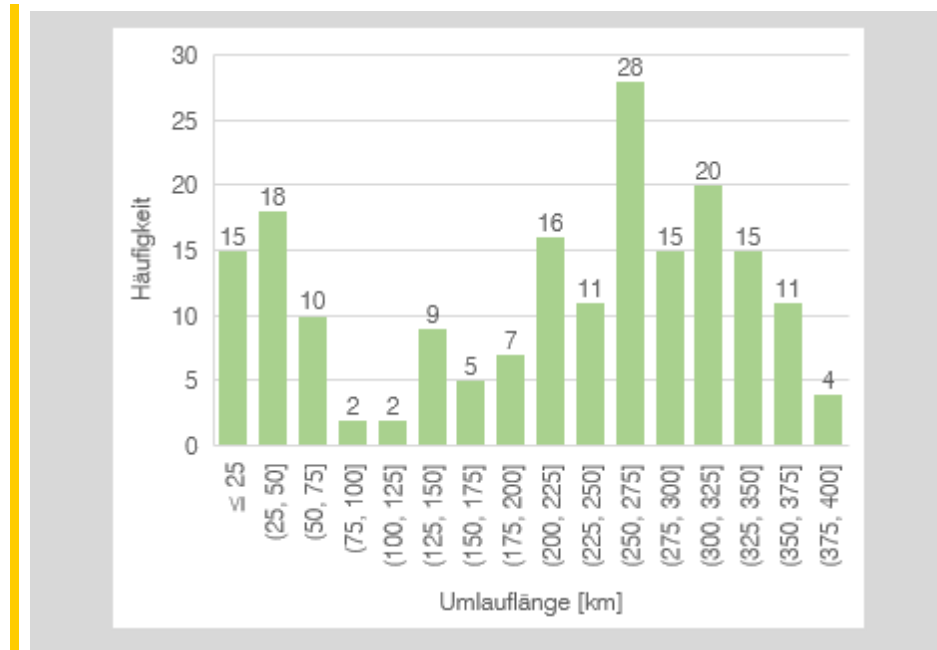


Abbildung 3.1: Histogramm der Umlauflängen (MoDo)

Durchschnittsgeschwindigkeiten

Auch die Durchschnittsgeschwindigkeit über die Fahrstrecke, also ohne Ein- oder Aussetzfahrten und ohne Wendezeiten und Warteaufenthalte, ist über einen weiten Bereich gestreut. In Abbildung 3.2 sind mit einer Klassenbreite von 0,5 km/h die Durchschnittsgeschwindigkeiten in einem Histogramm aufgetragen. Der Mittelwert liegt bei 20,3 km/h. Es gibt wenige Umläufe, die schneller als 25,0 km/h bzw. langsamer als 15,0 km/h sind. Der Großteil der Umläufe weist Durchschnittsgeschwindigkeiten zwischen 19,0 und 22,0 km/h auf.

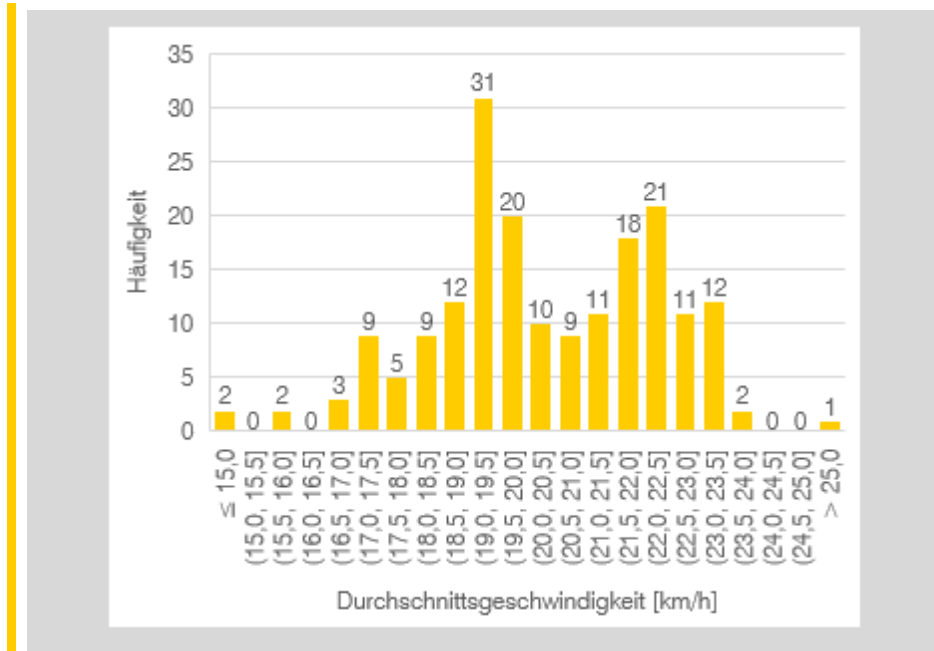


Abbildung 3.2: Histogramm der Durchschnittsgeschwindigkeit der Umläufe (MoDo)

Erste Einschätzung zur Ladestrategie (AP 2.1 Gegenüberstellung und Bewertung)

Um eine erste Bewertung der Umläufe hinsichtlich der beim Elektrobetrieb erforderlichen Ladestrategie vornehmen zu können, wurden diese nach ihren Laufleistungen und ihrem Wendezeitanteil eingestuft. Folgende Einstufungsparameter wurden für die Bewertung herangezogen:

- ▶ Vollladereinsatz bei Laufleistung < 200 km
- ▶ Gelegenheitsladereinsatz bei Wendezeitanteil > 12 %
- ▶ Betrieblicher Anpassungsbedarf bei Laufleistung > 200 km und Wendezeitanteil < 12 %

Alle 188 betrachteten Umläufe wurden somit einer Umlaufbewertung unterzogen. Die Ergebnisse werden als erste Einschätzung und zum späteren Zeitpunkt zur Plausibilisierung der Untersuchungsergebnisse herangezogen.

Untersuchungsbasis

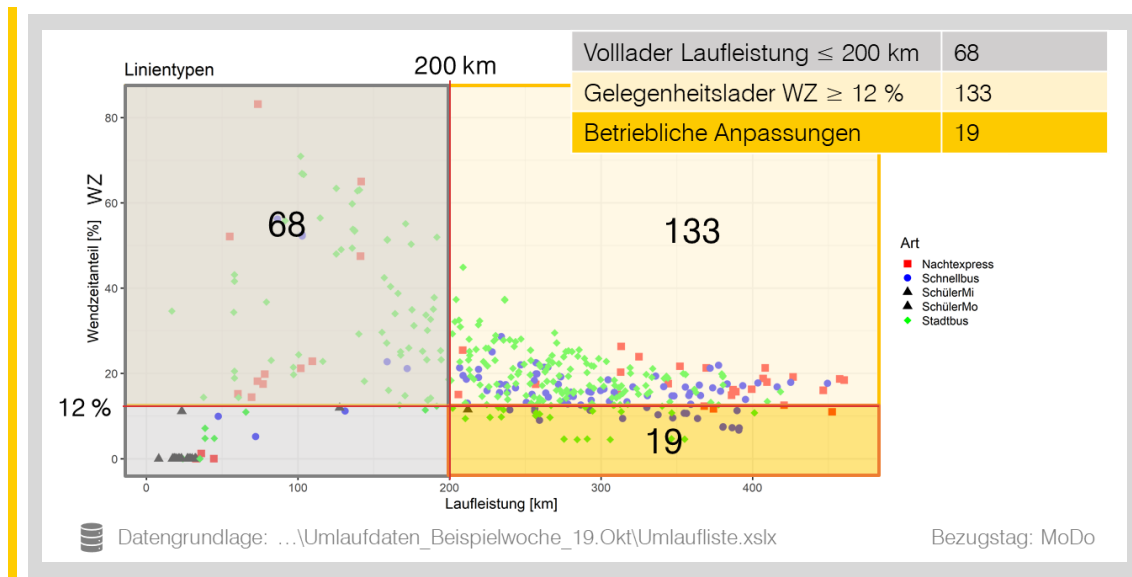


Abbildung 3.3: Erste Einschätzung zur Ladestrategie

In Abbildung 3.3 sind alle 188 Umläufe der Bezugstagesart MoDo über die Laufleistung und den Wendzeitanteil dargestellt.

Als rote Quadrate sind die NachtExpress-Umläufe, als blaue Kreise die Schnellbusumläufe, als schwarze Dreiecke die E-Wagen (Schüler Mi und Schüler Mo) und als grüne Rauten sind die Stadtbuss-Umläufe dargestellt. Die Grenzen spiegeln die maßgebenden Einstufungsparameter wider (Laufleistung 200 km und Wendzeitanteil 12 %). Die farblich markierten Flächen kennzeichnen die Bereiche, in denen sich die Umläufe für einen potenziellen Voll- oder Gelegenheitsladereinsatz bzw. die Umläufe, bei denen betriebliche Anpassungen vorzunehmen sind, befinden.

Bei 68 Umläufen beträgt die Laufleistung weniger als 200 km; entsprechend sind diese Umläufe für den Vollladereinsatz geeignet. Dies betrifft hauptsächlich die E-Wagen- sowie die Stadtbuss-Umläufe. Die Höhe des Wendzeitanteils ist bei diesen Umläufen weit gestreut.

133 Umläufe weisen einen Wendzeitanteil von mehr als 12 % auf; diese Umläufe sind nach erster Einschätzung für den Gelegenheitsladereinsatz geeignet. Den ermittelten 133 Umläufen können in erster Linie Schnellbusumläufe zugeordnet werden. Bei 32 der für den Gelegenheitsladereinsatz eingestuft 133 Umläufe beträgt die Laufleistung weniger als 200 km; diese Umläufe sind demnach potenzielle Volladerumläufe.

Untersuchungsbasis

Es wurden insgesamt 19 Umläufe identifiziert, die eine Laufleistung von mehr als 200 km und einen Wendezeitanteil von weniger als 12 % aufweisen. Um auf diesen Umläufen einen Elektrobusbetrieb abbilden zu können, sind hier betriebliche Anpassungen, wie bspw. eine Verlängerung der Wendezeiten vorzunehmen. Diesen Umläufen sind hauptsächlich die Schnellbusumläufe sowie andere Umläufe zuzuordnen.

4 Repräsentative Umläufe

4.1 Vorgehen zur Bildung der repräsentativen Umläufe

Eine Energiebilanzierung für jede einzelne Linie bzw. jeden einzelnen Umlauf der STOAG würde einen extrem hohen Aufwand erzeugen.

Aus diesem Grund erfolgte eine Clusterung innerhalb der zu untersuchenden Verkehrsleistung und eine Definition von entsprechenden Referenzszenarien (RSZ). Diese Szenarien bilden den betrieblichen Querschnitt des Liniennetzes ab. Die Bildung der Referenzszenarien erfolgte unter Maßgabe betrieblicher, verkehrlicher und topographischer Parameter sowie auf Grundlage betrieblicher Erfahrungen der STOAG.

Die STOAG-Linien wurden den definierten Referenzszenarien zugeordnet. Je Referenzszenario wurde eine Linie ausgewählt, die aus energetischer Sicht die höchsten Anforderungen an den Elektrobusbetrieb stellt. Je Linie wurde der repräsentative, d. h. der ebenso energetisch anspruchsvollste Umlauf bestimmt. Als Kriterien werden hierbei die Laufleistung, die Einsatzzeit und/oder der Wendezeitanteil herangezogen.

Für die ausgewählten repräsentativen Umläufe wurden alle für den Untersuchungszweck erforderlichen Linienparameter anhand der Umlaufplandaten berechnet.

4.2 Festlegen der repräsentativen Umläufe

Definieren der Referenzszenarien

Zur betrieblichen Abbildung des gesamten Liniennetzes der STOAG wurden als Referenzszenarien das Schnellbusszenario (RSZ A) und das Stadtbusszenario (RSZ B) gebildet. Diese werden hauptsächlich durch die folgenden Merkmale charakterisiert:

Repräsentative Umläufe

- ▶ A Schnellbusszenario
 - ▶▶ Hohe Laufleistung
 - ▶▶ Lange Einsatzzeit
 - ▶▶ Hohe Durchschnittsgeschwindigkeit
- ▶ B Stadtbusszenario
 - ▶▶ Mittlere Laufleistung
 - ▶▶ Mittlere Einsatzzeit
 - ▶▶ Geringe Durchschnittsgeschwindigkeit

Maßgebend für die Einstufung der Linien nach den Referenzszenarien ist die Durchschnittsgeschwindigkeit. Hierbei wird die Durchschnittsgeschwindigkeit bei Linienfahrten ohne Ein- und Aussetzen herangezogen. Die Einstufung erfolgt wie folgt:

- ▶ A Schnellbusszenario: $v > 20 \text{ km/h}$
- ▶ B Stadtbusszenario: $v \leq 20 \text{ km/h}$

Bestimmung der Linien

Gemeinsam mit der STOAG wurden folgende Linien bestimmt, die einen hohen energetischen Anspruch sowie eine hohe betriebliche Relevanz haben:

- ▶ SB92/SB93/SB98
- ▶ SB94
- ▶ 957
- ▶ 976

Die verknüpften Linien SB92/SB93/SB98 befahren große Teile des Stadtgebietes sowie die ÖPNV-Trassen zwischen Hauptbahnhof und Sterkrade.

Die Linie SB94 verbindet abseits der ÖPNV-Trasse verschiedene Stadtteilzentren an.

Die Linie 957 besitzt hohe betriebliche Ansprüche, da eine „Runde“ mit bis zu 56 km als außerordentlich lang betrachtet werden kann.

Die Linie 976 hat aufgrund der Anbindung des STOAG-Betriebshofes eine hohe innerbetriebliche Relevanz, da sie mitunter als Personalshuttle zu den Ablöseorten in der Stadt genutzt wird. Zudem ist die Linie 976 in ihrem Verlauf von einer großen Baumaßnahme betroffen, sodass hier eine Bewertung der Verspätungslage vorgenommen werden kann.

Repräsentative Umläufe

Zuordnung der Linien

Die aufgeführten Linien werden nach dem Kriterium der Durchschnittsgeschwindigkeit wie folgt den Referenzszenarien zugeordnet:

- ▶ A Schnellbusszenario
 - ▶▶ SB92/SB93/SB98
- ▶ B Stadtbusszenario
 - ▶▶ SB94
 - ▶▶ 957, 976

Als energetisch anspruchsvollste und demnach repräsentative Linien wurden für das Schnellbusszenario das Linienbündel SB92/SB93/SB98 und für das Stadtbusszenario die Linie SB94 bestimmt.

Die Linien 957 und 976 werden aufgrund ihrer erwähnten betrieblichen Relevanz ebenso weiter betrachtet.

Bestimmung der repräsentativen Umläufe

Maßgebend für die Bestimmung der repräsentativen Umläufe ist die maximale Einsatzzeit. Folglich wurde aus dem Linienbündel SB92/93/98 für das Schnellbusszenario der Umlauf 09803 als repräsentativer Umlauf ausgewählt. Aus der Linie SB94 wurde für das Stadtbusszenario der Umlauf 09406 bestimmt.

Die Umläufe 09812, 95701, 97603, 09401 und 09812 werden aufgrund ihrer betrieblichen Bedeutung als zusätzliche Umläufe ausgewählt.

In Abbildung 4.1 sind die Verläufe der repräsentativen Linien dargestellt. Die blau dargestellten Linien entsprechen dem Schnellbusszenario und die roten Linien dem Stadtbusszenario.

Repräsentative Umläufe



Abbildung 4.1: Linienvverläufe der Linien nach Referenzszenario

Repräsentative Umläufe

4.3 Soll-Daten (übergebene Umlaufdaten)

In Tabelle 4.1 sind ausgewählten repräsentativen Umläufe und deren betriebliche Parameter aufgeführt.

Referenzszenario	Fahrzeugtyp	Umlauf	Laufleistung [km]	Einsatzzeit [hh:mm]	Durchschnittsgeschwindigkeit (Fahrplan) [km/h]	Wendezeitanteil	Auswahlkriterium
repräsentative Umläufe							
A	G	09803	389,776	19:23	23,0	11 %	max. Laufleistung
B	G	09406	273,436	18:24	18,6	19 %	max. Laufleistung
zusätzliche Umläufe							
A	G	09812	256,358	13:13	22,3	11 %	geringer Wendezeitanteil
B	N	95701	313,357	17:59	19,5	11 %	sehr lange „Runde“ (56 km)
B	3	97603	294,477	19:04	19,6	11 %	Baustelle/Verspätungslage
B	N	09401	219,241	14:57	18,3	19 %	max. Laufleistung N
A – Schnellbusszenario B – Stadtbusszenario G – Gelenkbus N – 2-türiger Standardbus 3 – 3-türiger Standardbus							

Tabelle 4.1: Repräsentative und zusätzliche Umläufe

5 Energiebilanzierung

5.1 Eingangsdaten

5.1.1 Grundannahmen (ohne betriebliche Änderungen)

Die Ermittlung des spezifischen Energiebedarfs erfolgt je Referenzszenario auf Basis der durch die STOAG getroffenen Grundannahmen zur theoretischen Abbildung des geplanten Elektrobuseinsatzes. Berücksichtigt werden hier die betrieblichen Anforderungen sowie die technischen Eingangsparameter zur Konfiguration des E-Bus-Systems.

Die im Folgenden aufgeführten STOAG-spezifischen Eingangsgrößen gelten als Grundannahmen, die als maßgebende Randbedingungen der Systemkonfiguration zugrunde zu legen sind.

STOAG-spezifische Eingangsgrößen:

- ▶ Platzkapazität
 - ▶▶ SB: 90 Plätze
 - ▶▶ GB: 130 Plätze
- ▶ Max. Fahrzeuggesamtgewicht
 - ▶▶ SB: 19,5 t
 - ▶▶ GB: 28 t
- ▶ Heizung / Klimatisierung: Wärmepumpe
- ▶ Antrieb: Zentralmotor
- ▶ Durchschnittliche Fahrzeugauslastung: 2/4 Beladung

Der Berechnungsformel liegen spezifische Berechnungsparameter zugrunde. Die Festlegung der SORT- und TOPO-Einstufung sowie die der Referenzszenarien und entsprechender Referenzumläufe erfolgte spezifisch für das Liniennetz der STOAG.

Weitere Berechnungsparameter, wie das durchschnittliche Fahrgastgewicht oder die nutzbare Batteriekapazität, werden als generelle Parameter in der E-Bus-Systemauslegung herangezogen.

Energiebilanzierung

Berechnungsparameter:

Generelle E-Bus-Systemparameter:

- ▶ Durchschnittliches Fahrgastgewicht: 68 kg/Fahrgast
- ▶ Batteriegewicht: 8 kg/kWh
- ▶ Nutzbare Batteriekapazität: 80 % (nutzbarer SOC (netto) / technischer SOC (brutto))

STOAG-spezifische Parameter:

- ▶ SORT-Einstufung
 - ▶▶ RSZ A: SORT 3
 - ▶▶ RSZ B: SORT 2
- ▶ TOPO-Einstufung
 - ▶▶ RSZ A: TOPO 2
 - ▶▶ RSZ B: TOPO 2
- ▶ Referenzumläufe
 - ▶▶ RSZ A: 09803
 - ▶▶ RSZ B: 09406
- ▶ Durchschnittsgeschwindigkeit der Referenzumläufe
 - ▶▶ RSZ A (09803): 23,0 km/h
 - ▶▶ RSZ B (09406): 18,6 km/h

5.1.2 Spezifischer Energiebedarf je Referenzszenario

Berechnung

Es erfolgt eine Ermittlung der Energiebedarfe während der Fahrt, spezifisch für die Referenzszenarien (RSZ A, RSZ B) und die Fahrzeugtypen (SB, GB), ausgewiesen in kWh/km.

Zudem wird der Energiebedarf während der Halte an den Endpunkten, spezifisch für die Fahrzeugtypen (SB, GB) ermittelt, ausgewiesen in kWh/h.

Die Berechnung erfolgt unter Maßgabe aller verbrauchsrelevanten Eingangsgrößen, gemäß Eingangsgrößen – Grundannahmen (Kapitel 5.1.1).

Ergebnis

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Energiebedarfsermittlung, unter Berücksichtigung der getroffenen Grundannahmen tabellarisch dargestellt.

Energiebilanzierung

	SORT	TOPO	Solobus	Gelenkbus
RSZ A (Schnellbusszenario)	3	2	1,40 kWh/km	1,83 kWh/km
RSZ B (Stadtbusszenario)	2	2	1,63 kWh/km	2,11 kWh/km
Endpunkt			5,96 kWh/h	10,00 kWh/h

Tabelle 5.1: Ermittelter spezifischer Energiebedarf_Grundannahme

Auswertung

Den Ergebnissen ist der im Vergleich zum Solobus generell höhere Energiebedarf des Gelenkbusses zu entnehmen. Die dem RSZ B zugrunde liegenden geringeren Durchschnittsgeschwindigkeiten (SORT 2) spiegeln sich im höheren Energiebedarf gegenüber dem Energiebedarf des RSZ A (SORT 3) wider.

5.1.3 Auslegung Fahrzeugspeicher

Um einen möglichst flexiblen Einsatz, unter Vermeidung des Nachladens im Linieneinsatz, zu ermöglichen, wird bei der Konfiguration des Traktionsenergiespeichers zunächst das Prinzip der Maximierung bis zur maximalen Nutzlast verfolgt.

Berechnung

Zur Auslegung des Speichers wurden die betrieblichen Kenngrößen des Umlaufs herangezogen, der den betrieblichen Durchschnitt aller Umläufe abbildet. Aus dem lauleistungstärksten Referenzszenario (Schnellbusszenario – RSZ A) wurde der Umlauf 09005 mit einer Laufleistung von 225 km ausgewählt.

Unter Maßgabe der geforderten Laufleistung und die für Solo- und Gelenkbus anzusetzenden spezifischen Energiebedarfe wurde der erforderliche Energiebedarf zur Speicherauslegung bei Volladereinsatz ermittelt. Im Zuge der Energie- und Gewichtsbilanzierung wurde unter Berücksichtigung der technischen Randbedingungen – das sind die für den Solo- und Gelenkbus maximal zulässigen Fahrzeuggewichte sowie die anzusetzenden durchschnittlichen Fahrgast- und Batteriegewichtskenngrößen – die mögliche

Energiebilanzierung

Platzkapazität ausgewiesen. Zur Bewertung wurde der im Anhang 8 aufgeführte Zusammenhang zwischen Platzkapazität, Speicherauslegung und Reichweite herangezogen.

Ergebnisse

Bei einer geforderten Laufleistung von 225 km (Umlauf 09005, RSZ A) wurden zur Abbildung des Vollladereinsatzes folgende Energiebedarfe für die Speicherauslegung, d. h. die nutzbare Energiespeicherkapazität ($E_{\text{Batterie, netto}}$) ermittelt:

- ▶ SB: 394 kWh (brutto) / 315 kWh (netto)
- ▶ GB: 515 kWh (brutto) / 412 kWh (netto)

Die geforderte Platzkapazität kann nicht sichergestellt werden. Das Platzangebot reduziert sich auf folgende Werte:

- ▶ SB: 72 Plätze (von 90 geforderten Plätzen)
- ▶ GB: 94 Plätze (von 130 geforderten Plätzen)

Auswertung

Die Ergebnisse machen deutlich, dass ein Vollladereinsatz generell mit betrieblichen Einschränkungen verbunden ist. Es ist abzuwägen, ob bzw. inwieweit eine Reduzierung der Platzkapazität zur Abbildung des VL-Einsatzes akzeptabel ist.

5.2 Bewertung Vollladereinsatz

Ziel ist es, einen möglichst hohen Anteil der STOAG-Umläufe durch den Einsatz von Vollladern abzubilden. Das Liniennetz der STOAG wird daher hinsichtlich des Einsatzes von Vollladern unter der Maßgabe verschiedener Eingangsgrößen untersucht. Über die Ermittlung der umlaufspezifischen Gesamtenergiebedarfe, werden die Umläufe aufgezeigt, die durch den VL-Einsatz werden können.

Untersuchungsbasis stellen alle 188 Umläufe (MoDo) der in Oberhausen betriebenen Linien dar. Anteilig werden 98 Umläufe (21.803 km tägliche Laufleistung) von der STOAG selbst gefahren, 30 Umläufe (6.838 km tägliche Laufleistung) von den Subunternehmern Urban und Wohlgemuth/Mesenhohl und 60 Umläufe (11.128 km tägliche Laufleistung) von Fremdunternehmern.

Die Ladestrategie des VL sieht vor, dass die Ladung der Fahrzeuge ausschließlich im Betriebshof über Nacht erfolgt. Bei Bedarf kann ein Zwischenladen der Fahrzeuge über den Tagesverlauf im Betriebshof erfolgen; der Vollader wird demnach als Zwischenlader bezeichnet. Die Ladeleistung zum Zwischenladen beträgt 150 kW.

Die Untersuchung erfolgt für folgende Betrachtungsfälle:

- ▶ Bewertung Vollladereinsatz gemäß Eingangsdaten (5.2.3)
- ▶ Bewertung Vollladereinsatz mit reduzierter Platzkapazität (5.2.4)
- ▶ Bewertung Vollladereinsatz mit geteilten Umläufen (5.2.5)

5.2.1 Berechnungsgleichung zur Bewertung des VL-Einsatzes

Der Gesamtenergiebedarf je Umlauf setzt sich aus der zum Fahren benötigten Energie sowie der Energie während der Halte an den Wendepunkten zusammen. Die Clusterung der Umläufe in Referenzszenarien und die für jedes Referenzszenario ermittelten Energieverbräuche, differenziert nach SB und GB, werden als Berechnungsfaktoren in die Energiebedarfsermittlung einbezogen.

Zur umlaufspezifischen Berechnung des Energiebedarfs werden zudem die Umlauflängen (l_{Uml}) und Wendezeiten (t_{WZ}) herangezogen. Diese Werte sowie die umlaufspezifische Zuordnung des Fahrzeugtyps (SB, GB) wird der durch STOAG übergebenen Umlaufliste entnommen. Siehe hierzu auch Anhang 2.

Der Gesamtenergiebedarf $E_{\text{Uml,gesamt}}$ berechnet sich nach der in Abbildung 5.1 aufgeführten Gleichung.

Energiebilanzierung

$$E_{Uml,gesamt} = E_{Uml,Fahren} + E_{Uml,Wende}$$

$$E_{Uml,gesamt} = l_{Uml} \cdot e_{spez,Fahren} + t_{WZ} \cdot e_{spez,Wende}$$

$E_{Uml,gesamt}$	Gesamtenergiebedarf für einen Umlauf [kWh]	Umlauf
$E_{Uml,Fahren}$	Energiebedarf während des Fahrens [kWh]	Umlauf
$E_{Uml,Wende}$	Energiebedarf während der Wendezeit [kWh]	Umlauf
l_{Uml}	Länge/ Strecke/ Weg des Umlaufs [km]	Umlauf
$e_{spez,Fahren}$	spez. Energiebedarf während des Fahrens [kWh/km]	RSZ A / RSZ B
t_{WZ}	Wendezeit im Umlauf [h]	Umlauf
$e_{spez,Wende}$	spez. Energiebedarf während der Wendezeit [kWh/h]	SB / GB

Abbildung 5.1: Formel zur Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs

Der je Umlauf ermittelte Energiebedarf wird der je Fahrzeugtyp festgelegten Speichergröße (SB: 315 kWh (netto), GB: 412 kWh (netto)) gegenübergestellt.

$$E_{Batterie,netto} - E_{Uml,gesamt} = \begin{cases} > 0 \rightarrow VL - \text{Einsatz möglich} \\ < 0 \rightarrow VL - \text{Einsatz nicht möglich} \end{cases}$$

Abbildung 5.2: Formel zur Bewertung des VL-Einsatzes

Sobald der Energiebedarf $E_{Uml,gesamt}$ kleiner als die konfigurierte, nutzbare Energiespeicherkapazität ($E_{Batterie,netto}$) ist, ist ein Volladereinsatz auf dem jeweiligen Umlauf möglich. Diese Umläufe werden als elektrifizierbar eingestuft.

Umläufe, die hingegen ein energetisches Defizit aufweisen, d. h. Umläufe deren Energiebedarf größer ist als Energie über den Speicher bereitgestellt werden kann, gelten als nicht als Vollader elektrifizierbar.

Um den E-Bus-Betrieb unter diesen Umläufen sicherstellen zu können, sind geeignete Maßnahmen zu ergreifen. Hier gilt es iterativ vorzugehen, d. h. sich schrittweise dem optimalen Betriebskonzept zur Abbildung des E-Bus-Betriebs in Oberhausen zu nähern. Das Anpassen der in den Grundannahmen festgelegten Randbedingungen ist zur Abbildung des VL-Einsatzes erforderlich. Betriebliche Maßnahmen stellen bspw. die Reduzierung der Platzkapazität oder die Teilung von Umläufen dar. Aus technischer Sicht

Energiebilanzierung

könnten Änderungen in der Konfiguration des Fahrzeugs, bspw. der Antriebs- oder Nebenaggregate, den Energiebedarf reduzieren und somit zur Sicherstellung des VL-Einsatzes beitragen. Sofern keine der Maßnahmen ein zufriedenstellendes Ergebnis liefert, könnte eine Zwischenladung auf der Strecke, d. h. der Einsatz von GL in Betracht gezogen werden.

5.2.2 Bewertung des Volladereinsatzes am Beispiel des Umlaufs 09310

Beispielhaft sind im Folgenden die Berechnungsschritte zur Bewertung des Volladereinsatzes auf dem Umlauf 09310 aufgeführt. Im Ergebnis wurde für den Umlauf ein energetisches Defizit von 110,90 kWh ermittelt. Demnach kann mit dem konfigurierten Gelenk-Elektrobus, dessen nutzbare Speicherkapazität 412 kWh beträgt, der Volladereinsatz nicht abgebildet werden. Der Umlauf 09310 gilt als nicht elektrifizierbar.

Umlauf	09310, RSZ A, GB-Einsatz
l_{Uml}	274,99 km
$e_{\text{spez,Fahren}}$	1,83 kWh/km
t_{WZ}	1:58 h
$e_{\text{spez,Wende}}$	10,00 kWh/h
$E_{\text{Batterie,netto}}$	412 kWh
$E_{\text{Uml,gesamt}}$ $= 274,99 \text{ km} \cdot 1,83 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} + 1,97 \text{ h} \cdot 10 \frac{\text{kWh}}{\text{h}}$ $= 503,23 \text{ kWh} + 19,67 \text{ kWh} = 522,90 \text{ kWh}$	
$E_{\text{Batterie,netto}} - E_{\text{Uml,gesamt}}$ $= 412,00 \text{ kWh} - 522,90 \text{ kWh} = -110,90 \text{ kWh (Energiedefizit)}$	
< 0 → Volladereinsatz nicht möglich, Umlauf nicht elektrifizierbar	

Abbildung 5.3: Bewertung VL-Einsatz am Beispiel Umlauf 09310

5.2.3 Bewertung des Volladereinsatzes gemäß Eingangsdaten (Status Quo)

Der Untersuchung werden Eingangsdaten, entsprechend des Eingangsdatenblattes, die gemäß Eingangsdatenerhebung dem Status Quo entsprechen, zugrunde gelegt.

Energiebilanzierung

Eingangsdaten

- ▶ Max. zulässiges Fahrzeugesamtgewicht
 - ▶▶ SB: 19,5 t
 - ▶▶ GB: 28 t
- ▶ Geforderte Platzkapazität
 - ▶▶ SB: 90 Plätze
 - ▶▶ GB: 130 Plätze

Nach der Gesamtgewichtsbilanzierung wurden folgende maximale Speicherkapazitäten ermittelt:

- ▶ SB: 239 kWh (brutto) / 191 kWh (netto)
- ▶ GB: 211 kWh (brutto) / 169 kWh (netto)

Ergebnisse

In Tabelle 5.2 sind die als VL elektrifizierbaren Umläufe sowie deren Anteil an den Gesamtumläufen aufgeführt.

Unternehmen	spezifische Umläufe	Anzahl der VL-Umläufe	Anteil der VL-Umläufe	Anteil der VL-Umläufe - Gesamt -
STOAG	98	21	21 %	11 %
SUB	30	8	27 %	4 %
FREMD	60	19	32 %	10 %
Gesamt	188	48		26 %

Tabelle 5.2: Anzahl der als VL elektrifizierbaren Umläufe (Status Quo)

Der Tabelle 5.3 ist der Laufleistungsanteil der als VL elektrifizierbaren Umläufe zu entnehmen.

Energiebilanzierung

Unter-nehmen	spezifische Laufleistung	Laufleistung der VL-Umläufe	Anteil der VL-Laufleistung an Gesamt-laufleistung	Anteil der VL-Laufleistung an Gesamt-laufleistung - Gesamt -
STOAG	21.803 km	738 km	3,39 %	1,86 %
SUB	6.838 km	195 km	2,85 %	0,49 %
FREMD	11.128 km	1.123 km	10,05 %	2,82 %
Gesamt	39.769 km	1.745 km		5,17 %

Tabelle 5.3: Laufleistung der als VL elektrifizierbaren Umläufe (Status Quo)

Auswertung

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Sicherstellung eines optimalen, dem Dieselbus identischen, Platzangebots nur ca. ein Viertel der Umläufe als Vollader betrieben werden können. Der Laufleistungsanteil entspricht dabei nur 5,17 % der Gesamtlaufleistung.

Um den VL-Anteil zu erhöhen, wird in Betracht gezogen, die Platzkapazität um ein vertretbares Maß zu verringern. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme wird im nächsten Untersuchungsschritt ermittelt.

5.2.4 Bewertung des Vollladereinsatzes mit reduzierter Platzkapazität

Der Untersuchung wird eine reduzierte Platzkapazität zugrunde gelegt.

Eingangsdaten

- ▶ Max. zulässiges Fahrzeuggesamtgewicht
 - ▶▶ SB: 19,5 t
 - ▶▶ GB: 28 t
- ▶ Reduzierte Platzkapazität
 - ▶▶ SB: 70 Plätze
 - ▶▶ GB: 100 Plätze

Energiebilanzierung

Nach der Gesamtgewichtsbilanzierung wurden folgende maximale Speicherkapazitäten ermittelt:

- ▶ SB: 409 kWh (brutto) / 327 kWh (netto)
- ▶ GB: 466 kWh (brutto) / 373 kWh (netto)

Ergebnisse

In Tabelle 5.4 sind die als VL elektrifizierbaren Umläufe sowie deren Anteil an den Gesamtumläufen aufgeführt.

Unternehmen	spezifische Umläufe	Anzahl der VL-Umläufe	Anteil der VL-Umläufe	Anteil der VL-Umläufe - Gesamt -
STOAG	98	25	26 %	13 %
SUB	30	9	30 %	5 %
FREMD	60	31	52 %	16 %
Gesamt	188	65		35 %

Tabelle 5.4: Anzahl der als VL elektrifizierbaren Umläufe
(mit eingeschränkter Platzkapazität)

Energiebilanzierung

Der Tabelle 5.5 ist der Laufleistungsanteil der als VL elektrifizierbaren Umläufe zu entnehmen.

Unternehmen	spezifische Laufleistung	Laufleistung der VL-Umläufe	Anteil der VL-Laufleistung an Gesamtleistung	Anteil der VL-Laufleistung an Gesamtleistung - Gesamt -
STOAG	21.803 km	1.363 km	6,25 %	3,43 %
SUB	6.838 km	379 km	5,54 %	0,95 %
FREMD	11.128 km	3.003 km	26,99 %	7,55 %
Gesamt	39.769 km	4.744 km		11,93 %

Tabelle 5.5: Laufleistung der als VL elektrifizierbaren Umläufe (mit eingeschränkter Platzkapazität)

Auswertung

Der Gesamt-Gewichts-Energiebilanzierung des Fahrzeugs entsprechend führt eine reduzierte Platzkapazität zu einer höheren Speicherkapazität. Mit dem größer dimensionierten Fahrzeugspeicher kann der Energiebedarf von 35 % der Umläufe gedeckt werden. Dies entspricht einer Steigerung um 10 % zum Status Quo. Der Laufleistungsanteil der VL-Umläufe erhöht sich lediglich um 6,8 %-Punkte auf 11,9 % der Gesamtleistung.

Die Reduzierung der Platzkapazität allein reicht demnach nicht aus, um den VL-Betrieb im Gesamtnetz sicherstellen zu können.

Als weiterführende Maßnahme wird die Verkürzung der Umläufe hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet.

5.2.5 Bewertung des Vollladereinsatzes mit geteilten Umläufen

In der Untersuchung wird der ausschließliche Einsatz von VL im Gesamtnetz der STOAG abgebildet und die Auswirkungen auf den Betrieb aufgezeigt. Der Untersuchung wird eine reduzierte Platzkapazität zugrunde gelegt. Zudem sind betriebliche Änderungen in den Umläufen zulässig.

Energiebilanzierung

Um dem Untersuchungsumfang der Gesamtstudie zu entsprechen, wird von einer linienfeinen und umlaufspezifischen Untersuchung abgesehen. Es wird ein vereinfachter Untersuchungsansatz gewählt, der eine detaillierte Umlaufplanung nicht ersetzt. Zur Untersuchung werden demnach lediglich die durch die STOAG gefahrenen Umläufe (98 Umläufe) herangezogen.

Eingangsdaten

- ▶ Max. zulässiges Fahrzeuggesamtgewicht
 - ▶▶ SB: 19,5 t
 - ▶▶ GB: 28 t
- ▶ Reduzierte Platzkapazität (nach 5.2.4)
 - ▶▶ SB: 70 Plätze
 - ▶▶ GB: 100 Plätze
- ▶ Speicherkapazität (nach 5.2.4)
 - ▶▶ SB: 409 kWh (brutto) / 327 kWh (netto)
 - ▶▶ GB: 466 kWh (brutto) / 373 kWh (netto)
- ▶ Spezifische Energiebedarfe während der Fahrt (nach 5.1.2)
 - ▶▶ SB: 1,40 kWh/km (RSZ A), 1,63 kWh/km (RSZ B)
 - ▶▶ GB: 1,83 kWh/km (RSZ A), 2,11 kWh/km (RSZ B)
- ▶ Spezifische Energiebedarfe während der Wendezeit (nach 5.1.2)
 - ▶▶ SB: 5,96 kWh/h
 - ▶▶ GB: 10,00 kWh/h
- ▶ Umlaufdaten (nach 3.3)
 - ▶▶ 98 Umläufe (MoDO) der STOAG

Energiebilanzierung

Berechnung

Die Einstufung der Umläufe erfolgte nach den Referenzszenarien RSZ A und RSZ B. Zudem wurden die Umläufe nach den eingesetzten Fahrzeugtypen Solo-3-Türer, SB und GB differenziert. Entsprechend dieser Zuordnung werden der spezifische Energiebedarf, die Speicherkapazität und die mögliche Reichweite zur Untersuchung herangezogen.

Die Berechnungsgrößen sind in der folgenden Tabelle 5.6 aufgeführt.

	Spezifischer Energiebedarf		Reichweite	
	RSZ A	RSZ B	RSZ A	RSZ B
Solobus 70 Plätze 19,5 t	1,40 kWh/km	1,63 kWh/km	233 km	200 km
Gelenkbus 100 Plätze 28 t	1,83 kWh/km	2,11 kWh/km	204 km	177 km

Tabelle 5.6: Spezifischer Energiebedarf und Reichweite nach Bustyp und Referenzszenario

Im Falle der Teilung von Umläufen, sind je Teilumlauf zusätzliche Wege und Zeiten für das Ein- und Ausrücken anzusetzen. Dafür wurden aus den Umlaufdaten die durchschnittlichen Weglängen (Tabelle 5.7) und Zeiten (Tabelle 5.8), abhängig von Fahrzeugtyp und RSZ ermittelt.

Energiebilanzierung

	Ausrücken l_{Ausr}		Einrücken l_{Einr}	
	RSZ A	RSZ B	RSZ A	RSZ B
Solobus 70 Plätze 19,5 t	5,20 km	6,07 km	5,62 km	6,21 km
Gelenkbus 100 Plätze 28 t	6,57 km	5,45 km	5,80 km	4,21 km

Tabelle 5.7: Durchschnittliche Längen der Aus- und Einrückefahrten

	Ausrücken t_{Ausr} (min)		Einrücken t_{Einr} (min)	
	RSZ A	RSZ B	RSZ A	RSZ B
Solobus 70 Plätze 19,5 t	11 min	13 min	11 min	13 min
Gelenkbus 100 Plätze 28 t	14 min	12 min	12 min	9 min

Tabelle 5.8: Durchschnittliche Dauer der Aus- und Einrückefahrten

Die Teilung eines Umlaufes ist durchzuführen, sobald die Umlauflänge (l_{Uml}) größer als die Reichweite (l_{Reichw}) des eingesetzten Fahrzeugs ist – entsprechend folgender Gleichung:

$$l_{Reichw} - l_{Uml} = \begin{cases} > 0, \text{keine Teilung} \\ < 0, \text{Teilung notwendig} \end{cases}$$

Abbildung 5.4: Gleichung zur Bewertung der Umlaufteilung

Anhand der Laufleistung, der maximalen Reichweite und den zusätzlichen Wegen zum Ein- und Ausrücken kann der Teiler (n_{Teiler}) bestimmt werden, der angibt, in wie viele Teile ein entsprechender Umlauf getrennt werden muss. Der Teiler wird auf eine ganze Zahl aufgerundet. Der Berechnung liegt folgende Gleichung zugrunde:

$$n_{Teiler} = \left\lceil \frac{l_{Uml} + l_{Einr} + l_{Ausr}}{l_{Reichw}} \right\rceil$$

Abbildung 5.5: Gleichung zur Ermittlung des Umlaufteilers

Zwischenergebnis: Zur Trennung der Umläufe wurde für den Teiler n_{Teiler} der Wert 2 ermittelt. D. h. jeder Umlauf wird in maximal zwei Teile geteilt. Unter der Annahme, dass sich die Umlauflänge gleichmäßig über die Umlaufdauer verteilt, wird die Teilung der Umlauflängen und Umlaufzeiten mittig vorgenommen.

Jeder zu teilende Umlauf wird in einen a-Teil und b-Teil getrennt. Der a-Teil erhält einen zusätzlichen Aufschlag zum Einrücken, der b-Teil einen zusätzlichen Aufschlag zum Ausrücken.

Die Länge der Teilumläufe bestimmt sich wie folgt:

$$\begin{aligned} a\text{-Teil: } l_{Uml,a} &= \frac{l_{Uml}}{2} + l_{Einr} \\ b\text{-Teil: } l_{Uml,b} &= \frac{l_{Uml}}{2} + l_{Ausr} \end{aligned}$$

Abbildung 5.6: Gleichung zur Ermittlung der Umlauflängen der Teilumläufe

Die Dauer der Teilumläufe bestimmt sich wie folgt:

$$\begin{aligned} a\text{-Teil: } t_{Uml,a} &= \frac{t_{Uml}}{2} + t_{Einr} \\ b\text{-Teil: } t_{Uml,b} &= \frac{t_{Uml}}{2} + t_{Ausr} \end{aligned}$$

Abbildung 5.7: Gleichung zur Ermittlung der Umlaufzeiten der Teilumläufe

Aus der Anzahl an zu teilenden Umläufen und den damit verbundenen zusätzlichen Ein- und Ausrückfahrten ergibt sich der anzusetzende Mehrbedarf an Laufleistung und Einsatzdauer. Um den Fahrzeugmehrbedarf bestimmen zu können, müssen die Umläufe miteinander verknüpft werden.

Die Verknüpfungen werden nur innerhalb einer der drei Fahrzeugtypen vorgenommen. Um zwei Umläufe miteinander verknüpfen zu können, muss die notwendige Ladezeit (t_{Lade}) nach Absolvieren des ersten Umlaufs berechnet werden. Dazu wird entsprechend folgender Gleichung die

Energiebilanzierung

umlaufspezifische Energie zum Fahren und beim Wenden (E_{Lade}) berechnet und durch die Ladeleistung (P_{Lade}) dividiert.

$$t_{Lade} = \frac{E_{Lade}}{P_{Lade}} = \frac{e_{spez,Fahren} \cdot l_{Uml} + e_{spez,Wenden} \cdot t_{WZ}}{P_{Lade}}$$

Abbildung 5.8: Formel zur Ermittlung der Ladezeit

Zwischenergebnis: Es wurde die Ladeleistung $P_{Lade} = 150 \text{ kW}$ (netto) festgelegt.

Als Verspätungsausgleich und zum Abbilden von Zeiten für Rangierbewegungen auf dem Betriebshof wird zusätzlich zur Ladezeit eine Pufferzeit von 15 min angesetzt.

Alle Umläufe wurden hinsichtlich einer möglichen Verknüpfung untersucht. Eine Verknüpfung ist möglich, sobald nach dem Ende des ersten Umlaufs, zuzüglich der angesetzten Lade- und der Pufferzeit, der zweite Umlauf beginnt. So kann von einem Fahrzeug der zweite Umlauf absolviert werden. Sofern zum Ladeende (zzgl. Pufferzeit) der Umläufe keine passende Startzeit eines zweiten Umlaufs ermittelt werden kann, ist eine Umlaufverknüpfung nicht möglich.

Zwischenergebnis: Die Startzeiten der ersten Umläufe liegen zwischen 3:42 Uhr und 7:20 Uhr. Das entsprechende Ladeende (inkl. Pufferzeit) liegt zwischen 8:28 Uhr und 22:18 Uhr. Die Ladezeit (ohne Pufferzeit) beträgt im Mittel 1 h und 34 Minuten (min. 15 Minuten; max. 2 h und 29 Minuten). Die Startzeiten der zweiten Umläufe liegen zwischen 11:19 Uhr und 17:58 Uhr.

Beispiel

Am Beispiel der Umläufe 09310 und 09316 werden die Berechnungsschritte zur Teilung und möglicher Verknüpfungen erläutert.

- ▶ Umlauf 09310 (GB, RSZ A)
- ▶ Umlauf 09316 (GB, RSZ A)

Energiebilanzierung

Umlauf	Laufleistung	Wendezeit	Startzeit	Endzeit	Dauer
09310	274,99 km	1:58 h	04:20	19:04	14:44
09316	301,99 km	2:44 h	06:13	22:57	16:44

Tabelle 5.9: Spezifische Umlaufdaten (09310, 09316)

Die Länge der betrachteten Umläufe 09310 und 09316 überschreitet die mögliche Reichweite des konfigurierten Gelenkbusses (RSZ A: 204 km). Schlussfolgernd müssen beim Einsatz von VL die Umläufe geteilt werden.

In Tabelle 5.10 sind die spezifischen Umlaufdaten nach Teilung der Umläufe aufgeführt. Gemäß RSZ A für GB werden im Umlaufteil a der Einrückeweg in Höhe von 5,80 km und im Umlaufteil b der Ausrückeweg in Höhe von 6,57 km berücksichtigt. Gleichmaßen werden die Einrückezeit von 12 min und die Ausrückezeit von 14 min berücksichtigt.

Umlauf	Laufleistung	Wendezeit	Beginn Umlauf	Ende Umlauf	Dauer Umlauf	Ladezeit	Ladeende
09310-a	143,29 km	59 min	04:20	11:54	7 h 34 min	1 h 47 min	13:56
09310-b	144,07 km	59 min	11:27	19:04	7 h 36 min	1 h 47 min	
09316-a	156,79 km	1 h 22 min	06:13	14:47	8 h 34 min	1 h 45 min	17:00
09316-b	157,57 km	1 h 22 min	14:20	22:57	8 h 36 min	1 h 45 min	

Tabelle 5.10: Spezifische Umlaufdaten nach Umlaufteilung (09310, 09316)

Der Ladevorgang des Umlaufs 09310-a ist um 13:56 Uhr beendet (Umlaufende + Ladezeit + 15-min-Pufferzeit). Da der Umlauf 09316-b um 14:20 Uhr beginnt, also nach dem Ladeende des Umlaufs 09310-a, kann das Fahrzeug des Umlaufs 09310-a weiter den Umlauf 09316-b bedienen. Die beiden Umläufe konnten somit miteinander verknüpft werden.

Da nach dem Ladeende des Umlaufs 09316-a kein weiterer Umlaufbeginn identifiziert werden konnte, kann dieser Umlauf nicht verknüpft werden.

Der Umlauf 09310-b konnte mit dem Umlauf 40401 verknüpft werden. Das Ladeende vom Umlauf 40401 findet um 8:49 Uhr, also zeitlich dem Beginn von Umlauf 09310-b vorgelagert.

Energiebilanzierung

In Abbildung 5.9 sind die möglichen Verknüpfungen beispielhaft abgebildet.

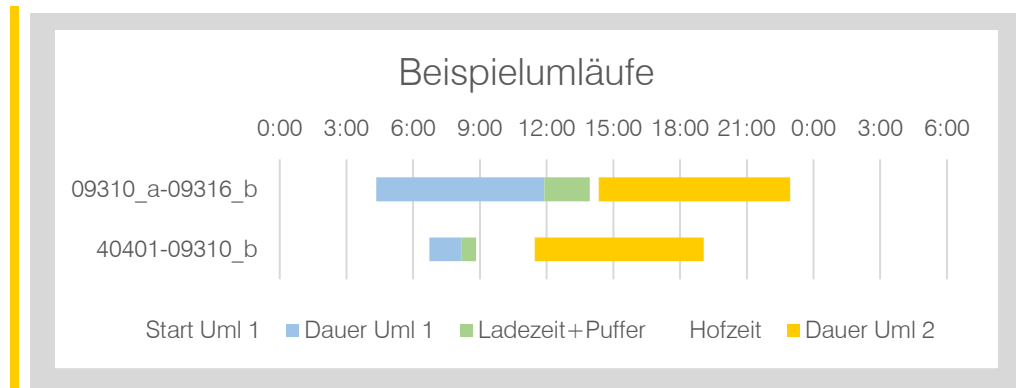


Abbildung 5.9: Verknüpfung von Umläufen (Beispiel)

Ergebnisse

Die Ergebnisse möglicher Verknüpfungen aller STOAG-Umläufe sind im Anhang 1, unterschieden nach den Fahrzeugtypen Solo-3-Türer, Solo und Gelenk, aufgeführt.

In Tabelle 5.11 ist der bei Umstellung aller Umläufe auf VL-Einsatz ermittelte Mehrbedarf an Fahrzeugen, Laufleistung und Einsatzzeit ersichtlich.

Energiebilanzierung

		Fahrzeugein- satz Status Quo	Volllader- einsatz	Absoluter Mehrbedarf	Relativer Mehrbedarf
Fahrzeuge	Solo-3- Türer ⁷	22	33	11	50%
	Solo	20	27	7	35%
	Gelenk	48	73	25	52%
	Gesamt	90	133	43	48%
Laufleistung	Gesamt	21.803 km	22.682 km	879 km	4%
Einsatzzeit	Gesamt	1.269 h	1301 h	32 h	3%

Tabelle 5.11: Übersicht Mehrbedarfe bei Vollladereinsatz

Der ermittelte Fahrzeugmehrbedarf beträgt 48 %. Der Wert ist als Maximalwert einzustufen. Im Berechnungsansatz wird davon ausgegangen, dass infolge der Teilung der Umläufe, jeweils nach dem Einrücken ein zusätzlicher Zeitanteil zum Nachladen der Batterien erforderlich ist. Es bestehen somit Optimierungspotentiale, die durch eine weitere Verknüpfung von Teilumläufen im Zuge einer kompletten Umlaufplanung ermittelt werden können. Dies ist jedoch nicht Bestandteil der Machbarkeitsstudie.

Der Mehrbedarf von Laufleistung und Einsatzzeit erhöht sich aufgrund der zusätzlichen Ein- und Ausrückewege um 4 % bzw. 3 %.

Auswertung

Durch die Umlaufteilung und reduzierte Platzkapazität kann ein Vollladereinsatz sichergestellt werden.

Zudem können die ermittelten Mehrbedarfe an Laufleistung und Einsatzzeit als Richtwerte für erforderliche betriebliche Änderungen herangezogen werden. Hinsichtlich des ermittelten Fahrzeugmehrbedarfs sei angemerkt, dass diese Werte eine obere Schätzung darstellen.

Der ermittelte Fahrzeugmehrbedarf von insgesamt 48 % (43 Fahrzeuge) stellt einen erheblichen ökonomischen Mehraufwand dar. Sofern der Ansatz

⁷ Hinweis | inkl. Hybrid- und Elektrobuss

Energiebilanzierung

des VL-Einsatzes im Gesamtnetz verfolgt wird, wird empfohlen, eine vollladerspezifische Umlaufplanung durchzuführen. Hierbei ist das Augenmerk auf die batteriebuspezifischen Anforderungen zu legen; dies betrifft insbesondere die begrenzte Reichweite und die zusätzlichen Ladezeiten tagsüber.

Aus den Projekterfahrungen der VCDB heraus, ist es durchaus denkbar, dass der Fahrzeugmehrbedarf wesentlich reduziert werden kann. Eine wichtige Rolle dabei spielt die Verteilung der Fahrleistungen über den Tag. Begünstigend kann dabei ein auf die Nachfrage angepasstes Angebot mit Früh- und Spätspitze sein. Dies ist in Oberhausen mit den E-Wagen der Fall. Zudem sollte sich auch die zentrale Lage des Betriebshofes im Stadtgebiet positiv ausüben.

5.3 Bewertung Gelegenheitsladereinsatz

Das Liniennetz der STOAG wird hinsichtlich des Einsatzes von Gelegenheitsladern untersucht. Untersuchungsbasis stellen alle 188 Umläufe (MoDo) der in Oberhausen betriebenen Linien dar. Die Ladung der Fahrzeuge erfolgt an geeigneten Endpunkten mit einer Ladeleistung von 300 kW. Die Höhe der Ladeleistung wurde im Sinne einer speicherschonenden Ladung als batterieverträgliche Ladeleistung festgelegt.

Es werden die Umläufe aufgezeigt, die als GL elektrifiziert werden können.

Eingangsdaten

- ▶ Max. zulässiges Fahrzeuggesamtgewicht
 - ▶▶ SB: 19,5 t
 - ▶▶ GB: 28 t
- ▶ Geforderte Platzkapazität
 - ▶▶ SB: 90 Plätze → reduziert auf 70 Plätze
 - ▶▶ GB: 130 Plätze → reduziert auf 100 Plätze
- ▶ Speicherkapazität
 - ▶▶ SB: 409 kWh (brutto) / 327 kWh (netto)
 - ▶▶ GB: 466 kWh (brutto) / 373 kWh (netto)
- ▶ Spezifische Energiebedarfe während der Fahrt (nach 5.1.2)
 - ▶▶ SB: 1,40 kWh/km (RSZ A), 1,63 kWh/km (RSZ B)

Energiebilanzierung

- ▶▶ GB: 1,83 kWh/km (RSZ A), 2,11 kWh/km (RSZ B)
- ▶ Spezifische Energiebedarfe während der Wendezeit (nach 5.1.2)
 - ▶▶ SB: 5,96 kWh/h
 - ▶▶ GB: 10,00 kWh/h
- ▶ Ladeleistung am Endpunkt: 300 kW (brutto) / 270 kW (netto)
- ▶ Wirkungsgrad der Ladeinfrastruktur: $\eta = 0,9$

Berechnung

Aus den Eingangsdaten werden der umlaufspezifische Energiebedarf zum Fahren und an den Wenden sowie die Speicherkapazität des Fahrzeugs zum Ansatz gebracht. Die Energie, die an den Endpunkten nachgeladen werden kann, ist noch zu ermitteln.

An jedem Endpunkt besteht die Möglichkeit zur Zwischenladung. Die am Endpunkt zur Verfügung stehende Ladezeit t_{Lade} ist entsprechend den Eingangsgrößen in Abbildung 5.10 und der Berechnungsgleichung in Abbildung 5.11 zu bestimmen. Die nutzbare Ladezeit entspricht 80 % der Wendezeit abzüglich von Kontaktierungszeit und Verspätungsausgleich.

Die Anzahl der Wenden n wird aus den Umlaufdaten ermittelt. Es werden nur Wendezeiten einbezogen, die größer als 3 min sind. So bleiben kurze Wendezeiten und Linienübergänge, die zu einer Verfälschung des Ergebnisses führen würden, unberücksichtigt.

Die zum Laden zur Verfügung stehende Ladezeit beträgt 80 % der umlaufspezifischen Wendezeit. Mithilfe dieses Faktors soll ausgeglichen werden, dass Wendezeiten nicht immer gleichmäßig verteilt sind und Wartezeiten bei Mehrfachbelegung der Ladepunkte nicht zum Nachladen genutzt werden können.

Der Verspätungsausgleich am Endpunkt t_{Versp} wird mit 2 Minuten berücksichtigt. Als Kontaktierungszeit $t_{Kontakt}$ wird 1 Minute angesetzt.

In der Berechnung wird die Lage der Wendezeiten im Verlauf des Umlaufs nicht berücksichtigt. Punktuell auftretende hohe Verspätungen werden ebenfalls nicht berücksichtigt.

Energiebilanzierung

n	Anzahl der Wenden
t_{WZ}	Wendezeit
$t_{Kontakt}$	1 min
t_{Versp}	2 min
Verhältnis von Ladezeit zu Wendezeit	80 %

Abbildung 5.10: Eingangsgrößen zur Ermittlung der nutzbaren Ladezeit

$$t_{Lade} = (t_{WZ} - n \cdot (t_{Kontakt} + t_{Versp})) \cdot 80 \%$$

$$t_{Lade} = 80 \% \cdot (t_{WZ} - n \cdot 3 \text{ min})$$

Abbildung 5.11: Gleichung zur Ermittlung der nutzbaren Ladezeit

Die Energie $E_{Zwischenladen}$, die in innerhalb der nutzbaren Ladezeit t_{Lade} nachgeladen werden kann, bestimmt sich aus dem Produkt der Ladezeit, der Ladeleistung P_{Lade} und des Wirkungsgrades η der Ladeleistung.

$$E_{Zwischenladen} = P_{Lade} \cdot \eta \cdot t_{Lade}$$

Abbildung 5.12: Gleichung zur Ermittlung der nutzbaren Energie

Analog zum Vorgehen bei der Untersuchung zum Vollladereinsatz kann nun eine energiebezogene Einstufung der Umläufe hinsichtlich der Eignung zum Gelegenheitsladereinsatz vollzogen werden. Die Einstufung erfolgt mittels nachstehender Gleichung.

$$E_{Batterie,netto} + E_{Zwischenladen} - E_{Uml,gesamt}$$

$$= \begin{cases} > 0 \rightarrow GL - \text{Einsatz möglich} \\ < 0 \rightarrow GL - \text{Einsatz nicht möglich} \end{cases}$$

Abbildung 5.13: Gleichung zur Bewertung des GL-Einsatzes

Ist die zur Verfügung stehende Energie, d. h. die Summe der Speicherkapazität $E_{Batterie,netto}$ und der am Endpunkt zum Zwischenladen zur Verfügung stehenden Energie $E_{Zwischenladen}$, größer als der Gesamtenergiebedarf $E_{Uml,gesamt}$, so kann der GL-Einsatz sichergestellt werden; andernfalls nicht.

Ergebnisse

In Tabelle 5.12 sind die als GL elektrifizierbaren Umläufe sowie deren Anteil an den Gesamtumläufen aufgeführt.

Unternehmen	spezifische Umläufe	Anzahl der GL-Umläufe	Anteil der GL-Umläufe	Anteil der GL-Umläufe - Gesamt -
STOAG	98	97	99 %	52 %
SUB	30	30	100 %	16 %
FREMD	60	58	97 %	31 %
Gesamt	188	185		98 %

Tabelle 5.12: Anzahl der als GL elektrifizierbaren Umläufe

Der Tabelle 5.13 ist der Laufleistungsanteil der als GL elektrifizierbaren Umläufe zu entnehmen.

Unternehmen	spezifische Laufleistung	Laufleistung der GL-Umläufe	Anteil der GL-Laufleistung an Gesamtleistung	Anteil der GL-Laufleistung an Gesamtleistung - Gesamt -
STOAG	21.803 km	21.413 km	98,2 %	53,8 %
SUB	6.838 km	6.838 km	100 %	17,2 %
FREMD	11.128 km	10.427 km	93,7 %	26,2 %
Gesamt	39.769 km	38.678 km		97,3 %

Tabelle 5.13: Laufleistung der als GL elektrifizierbaren Umläufe

Bei einer an den Endpunkten zur Verfügung stehenden Ladeleistung von 300 kW (brutto) können 97,3 % der Laufleistung als Gelegenheitslader elektrifiziert werden. Auf den Umläufen 09803, 13601 und 13602 ist der GL-Betrieb nicht abbildbar. Diese Umläufe verfügen nicht über ausreichend Wendezeit, um die für den weiteren Betrieb notwendige Energie an den Endpunkten nachladen zu können.

Energiebilanzierung

Auswertung

Unter den getroffenen Annahmen und unter der Voraussetzung, dass alle erforderlichen Endpunkte als Ladepunkte mit einer Ladeleistung von 300 kW ausgebaut werden können, ist eine Umstellung weitestgehend aller Umläufe auf GL-Betrieb möglich.

Da die Errichtung von Ladeinfrastruktur nicht an allen Endpunkten möglich ist (siehe 9.1.2.2), ist eine detaillierte Bewertung der auf GL umzustellenden Umläufe unter Berücksichtigung der spezifischen Ladestandortbewertung durchzuführen. Es ist zu prüfen, an welchen Endpunkten die Errichtung von Ladeinfrastruktur als möglich eingeschätzt wird. Die Wendezeiten und Verspätungslagen an den Endpunkten sind hinsichtlich möglicher Ladezeiten zu bewerten.

Im nächsten Schritt soll unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen eine detaillierte Untersuchung der unter Einsatz von Gelegenheitsladern geplanten Elektrobushlinien erfolgen.

5.4 Untersuchung der geplanten E-Buslinien SB97/952, 953/961, 955 und 956

Der Einsatz der 15 neuen, derzeit im Beschaffungsprozess befindlichen, Solo-Elektrobusse ist auf den Linien SB97/952, 953/961, 955 und 956 vorgesehen. Es ist geplant, die Fahrzeuge als Gelegenheitslader einzusetzen.

Die Untersuchung erfolgt zum einen ladepunktoffen und zum anderen unter der Maßgabe der Nachladung an den durch die STOAG geplanten Ladestandorten Anne-Frank-Realschule (SB97/952, 955) und Wehrstraße (953/961, 956).

Die Untersuchung erfolgt für folgende Betrachtungsfälle:

- ▶ Ladepunktoffene Betrachtung (5.4.1)
- ▶ Ladepunktfeste Betrachtung (5.4.2)
- ▶ Ladepunktfeste Betrachtung, mit geänderter Verspätungslage (5.4.3)

5.4.1 Ladepunktoffene Betrachtung

Zielstellung der ladepunktoffenen Untersuchung ist es, Aussagen zur notwendigen Auslegung der Ladeinfrastruktur an der Strecke zu treffen. Im Konkreten sollen die Höhe der notwendigen Ladeleistung sowie die

Energiebilanzierung

erforderliche Anzahl der Ladepunkte (LP) an einem Endpunkt bestimmt werden, sofern sich Ladezeiten von verschiedenen Fahrzeugen am Endpunkt überschneiden.

Je Linie bzw. je Linienkombination (SB97/952, 953/961, 955, 956) wird ein Umlauf detailliert mit dem VCDB-Tool BeSystO untersucht. Dazu werden die Fahrplandaten ohne und mit angenommener Verspätung für jeden der zu untersuchenden Umläufe analysiert und ausgewertet.

Über die Parametrisierung der Ladeinfrastruktur an der Strecke kann festgestellt werden, ob der entsprechende Umlauf elektrifizierbar ist.

Eingangsdaten

- ▶ Fahrzeugtyp: Solobus
- ▶ Platzkapazität: 70 Plätze
- ▶ Max. Fahrzeuggesamtgewicht: 19,5 t
- ▶ Heizung / Klimatisierung: Wärmepumpe
- ▶ Antrieb: Zentralmotor
- ▶ Durchschnittliche Fahrzeugauslastung: 2/4 Beladung
- ▶ RSZ B, SORT 2, TOPO 2
- ▶ Speicherkapazität: 409 kWh (brutto) / 327 kWh (netto)
- ▶ Spezifische Energiebedarfe: 1,63 kWh/km; 5,96 kWh/h

Annahmen zur Verspätung

Der Untersuchung werden die in Tabelle 5.14 aufgeführten theoretischen Verspätungslagen zugrunde gelegt.

Zeitfenster	Verspätung
00:00 – 06:00	0 min
06:00 – 09:00	7 min
09:00 – 15:00	2 min
15:00 – 18:00	8 min
18:00 – 20:00	4 min
20:00 – 24:00	0 min

Tabelle 5.14: Angenommene Verspätungen, gemäß Eingangsdaten

Energiebilanzierung

Untersuchte Linien

Die zu untersuchenden Linien sind durch folgende Linienverläufe gekennzeichnet:

- ▶ **SB97/952 (5 Umläufe)**
Anne-Frank-Realschule - OB-Hbf. - Buschhausen - Sterkrade Bf.
←SB97/952→ Sterkrade Bf. - Hagelkreuz - Nordfriedhof - Everslohstraße
- ▶ **953/961 (4 Umläufe)**
Wehrstraße - Dümpten - Knappenmarkt - Neue Mitte - Tackenberg - Spechtstraße ←953 / 961→ Spechtstraße - Markt - BOT-Fuhlenbrock - Osterfeld - Neue Mitte - OB-Hbf. - Wehrstraße ←961 / 953→
- ▶ **955 (2 Umläufe)**
Anne-Frank-Realschule - OB-Hbf. - Buschhausen - Sterkrade Bf. - Alsfeld - Heinrich-Böll-Gesamtschule
- ▶ **956 (4 Umläufe)**
Wehrstraße - OB-Hbf. - Schloss Oberhausen - Johanniter Krankenhaus - Sterkrade Bf. - Goerdelerstr.

Berechnung

Mittels Analyse der Fahrplandaten werden zunächst für jede Linie die Endpunkte bestimmt, an denen eine Nachladung aus energetischer Sicht zweckmäßig erscheint. Die Höhe der Wendezeit am Endpunkt wird hier als maßgebendes Kriterium herangezogen. Die ausgewählten Endpunkte werden als bevorzugte Ladepunkte definiert. Anschließend wird untersucht, ob über die bevorzugten Ladepunkte der Energiebedarf des jeweiligen Umlaufs vollständig gedeckt werden kann. Dies erfolgt jeweils für den SOLL-Fahrplan ohne und mit Verspätung. Sollte dies nicht der Fall sein, so wird der zweite Linienendpunkt als zusätzlicher Ladepunkt mit in die Betrachtung einbezogen.

Ermittlung bevorzugter Ladepunkte

In Tabelle 5.15 wurden die Linienendpunkte entsprechend ihrer mittleren zur Verfügung stehenden Ladezeit (ohne Verspätung) als bevorzugte bzw. zusätzliche Ladepunkte eingestuft. Zusätzlich wurde die Anfälligkeit der Linien hinsichtlich auftretender Verspätungen bewertet.

Energiebilanzierung

Die Endpunkte Everslohstr. (EVE), Spechtstr. (SPC), Anne-Frank-Realschule (AFR) und Wehrstr. (WEH) gelten als bevorzugte Ladepunkte. Die Endpunkte Anne-Frank-Realschule, Heinrich-Böll-Gesamtschule (HBG) und Goerdelerstr. (GOE) werden als zusätzliche Ladepunkte betrachtet.

Linie	bevorzugter Ladepunkt		zusätzlicher Ladepunkt		Anfälligkeit des GL für Verspätungen
	Bezeichnung	mittl. Ladezeit je Halt	Bezeichnung	mittl. Ladezeit je Halt	
SB97/952	EVE	6 min	AFR	4 min	sehr hoch
953/961	SPC	15 - 17 min	-	-	gering
955	AFR	8 min	HBG	5 min	mittel
956	WEH	8 - 12 min	GOE	5 - 9 min	hoch

Tabelle 5.15: Übersicht Ladepunkte und mittlere, zur Verfügung stehende Ladezeiten im verspätungsfreien Fall

Bewertung der Umläufe hinsichtlich Verspätungslage

Auf Basis der vorliegenden Fahrpläne wurden linienspezifisch die anspruchsvollsten Umläufe, d. h. die Umläufe mit den geringsten Wendezeiten über den Tagesverlauf, ermittelt. In Tabelle 5.16 sind für die Umläufe jeweils die Wendezeiten ohne Verspätung (o. V.) und unter Berücksichtigung der angenommenen Verspätungslagen mit Verspätung (m. V.) angegeben.

Die Wendezeiten einiger Umläufe werden infolge der angesetzten Verspätungen extrem reduziert. Die für die Ladevorgänge zur Verfügung stehenden Wendezeiten werden als kritisch eingestuft. Diese Umläufe sind in der Tabelle rot gekennzeichnet.

Energiebilanzierung

Linie	Fahrplan	Wendezeit				
Umlaufnummer		01. / 40.	02. / 41.	03. / 42.	04. / 43.	44.
SB97/952	o. V.	3 h 13 min	2 h 12 min	1 h 36 min	2 h 46 min	1 h 38 min
	m. V.	2 h 8 min	1 h 9 min	36 min	1 h 41 min	33 min
953/956	o. V.	2 h 57 min	2 h 47 min	2 h 35 min	3 h 4 min	
	m. V.	2 h 22 min	2 h 1 min	2 h	2 h 17 min	
955	o. V.	2 h 3 min	2 h 15 min			
	m. V.	1 h	1 h 11 min			
956	o. V.	2 h 15 min	2 h 26 min	3 h 1 min	2 h 57 min	
	m. V.	1 h 22 min	1 h 25 min	1 h 56 min	1 h 57 min	

Tabelle 5.16: Wendezeiten ohne und mit Verspätung

Bewertung der Umläufe hinsichtlich Umlauflänge

Neben der Verspätungslagen haben die Umlauflänge und entsprechend die Einsatzdauer einen entscheidenden Einfluss auf den GL-Betrieb. Diese Faktoren sind maßgebend bei der Auswahl der näher zu betrachtenden Umläufe. In Tabelle 5.17 sind die ausgewählten Umläufe und die entsprechenden Auswahlkriterien aufgeführt.

Als energetisch anspruchsvollste und somit für die Untersuchung relevante Umläufe wurden die Umläufe SB97/952 – 40 und 42; 953/956 – 42; 955 – 01; 956 – 02 ermittelt. Für die Linien SB97/952 wurden zwei Umläufe (40, 42) betrachtet, da andernfalls nicht alle relevanten betrieblichen Umstände berücksichtigt werden können.

Linie	Ausgewählter Umlauf	Auswahlkriterien
SB97/952	40.	Länge [km]; rel. viel Wendezeit am Anfang und Ende des Umlaufs
	42.	geringste Wendezeit
953/956	42.	geringste Wendezeit

Energiebilanzierung

Linie	Ausgewählter Umlauf	Auswahlkriterien
955	1.	geringere Wendezeit
956	2.	geringste Wendezeit am bevorzugten LP

Tabelle 5.17: Auswahlkriterien für die Auswahl als repräsentativer Umlauf für die jeweiligen Linien

Bestimmung der Ladeleistung

Wie die Vorbetrachtungen zeigen, stehen teilweise sehr kurze Ladezeiten, insbesondere im Verspätungsfall, an den vorgesehenen Ladepunkten zur Verfügung. Um ausreichend Energie in kurzer Zeit übertragen zu können, wird eine Ladeleistung von 300 kW (brutto) für die Ladevorgänge angesetzt. Eine höhere Ladeleistung wird vorerst nicht empfohlen, da dies die Auswahl möglicher Fahrzeughersteller stark einschränken würde.

Ergebnis

Es wird von einer Nachladung an den bevorzugten Ladepunkten mit einer Ladeleistung von 300 kW ausgegangen. Es wurde der Ladezustand für die Betrachtungsfälle ohne und mit Verspätung ermittelt. Daraus wurde die Umsetzbarkeit des Gelegenheitsladereinsatzes abgeleitet. Sofern der SOC_{min} -Wert des spezifisch untersuchten Umlaufs sehr gering ist bzw. Null beträgt, ist der Elektrobusbetrieb nicht abbildbar, d. h. die Linie wird als nicht elektrifizierbar eingestuft. Sofern der E-Bus-Betrieb mit einem Ladepunkt nicht umsetzbar ist, wird der E-Bus-Einsatz mit einem zusätzlichen Ladepunkt bewertet.

Zur Verbildlichung der Ergebnisse soll die umlaufspezifische Darstellung der SOC-Verläufe über einen kompletten Betriebstag dienen. Die Abbildungen zeigen den Ladezustandsverlauf in den verschiedenen Betrachtungsszenarien. Die bei 90 % bzw. 10 % gesetzten SOC_{max} - und SOC_{min} -Linien kennzeichnen die Abgrenzung des technisch nutzbaren Energieinhaltes. Die blaue Linie markiert zusätzlich eine betriebliche Mindestreserve zum sicheren Erreichen des Betriebshofes aus dem Einsatzgebiet. Ziel ist es, dass sich der Ladezustand der Batterie in den definierten SOC-Grenzen befindet.

Energiebilanzierung

Linie SB97/952

- ▶ Linie mit zwei Ladepunkten elektrifizierbar, jedoch starker Abfall des Ladezustands

Linie	Umlauf	bevorzugter Ladepunkt				bevorz. & zusätzl. Ladepunkt	
		ohne Verspätung		mit Verspätung		mit Verspätung	
		machbar?	SOC _{min}	machbar?	SOC _{min}	machbar?	SOC _{min}
SB97/952		EVE		EVE		EVE & AFR	
	40	ja	52,0 %	nein	0 %	vielleicht	4,3 %
	42	ja	58,1 %	nein	0 %	ja	10,1 %

Tabelle 5.18: Bewertung GL-Einsatz ohne und mit Verspätung (SOLL-Daten) – Linie SB97/952

Folgende SOC-Verläufe wurden für den Umlauf 95240 ermittelt:

- ▶ Abbildung 5.14: ohne Verspätung und mit einem Ladepunkt an der Everslohstraße
- ▶ Abbildung 5.15: mit Verspätung und mit einem Ladepunkt an der Everslohstraße
- ▶ Abbildung 5.16: mit Verspätung und mit zwei Ladepunkten an der Everslohstraße und der Anne-Frank-Realschule

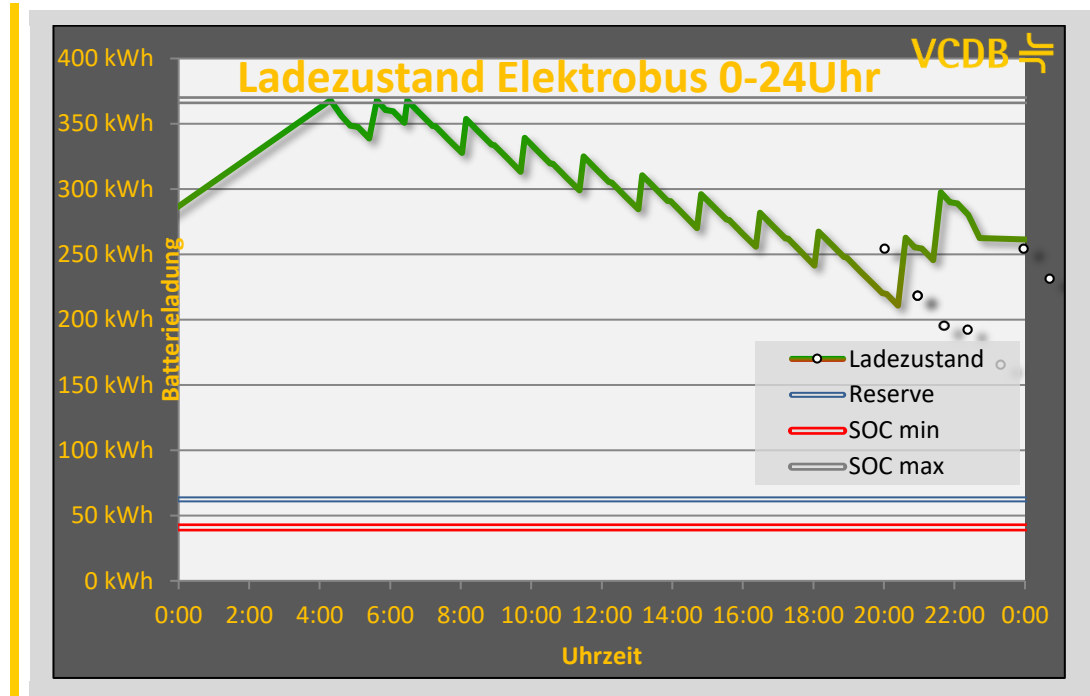


Abbildung 5.14: SOC-Verlauf Umlauf 95240, ohne Verspätung, 1 LP EVE

Der Ladezustand nimmt im Tagesverlauf leicht ab. Ein kritischer Ladezustandsbereich wird nicht erreicht. Der Elektrobusbetrieb kann ohne Verspätung und mit einem Ladepunkt am Endpunkt Everslohstraße sichergestellt werden.

Energiebilanzierung

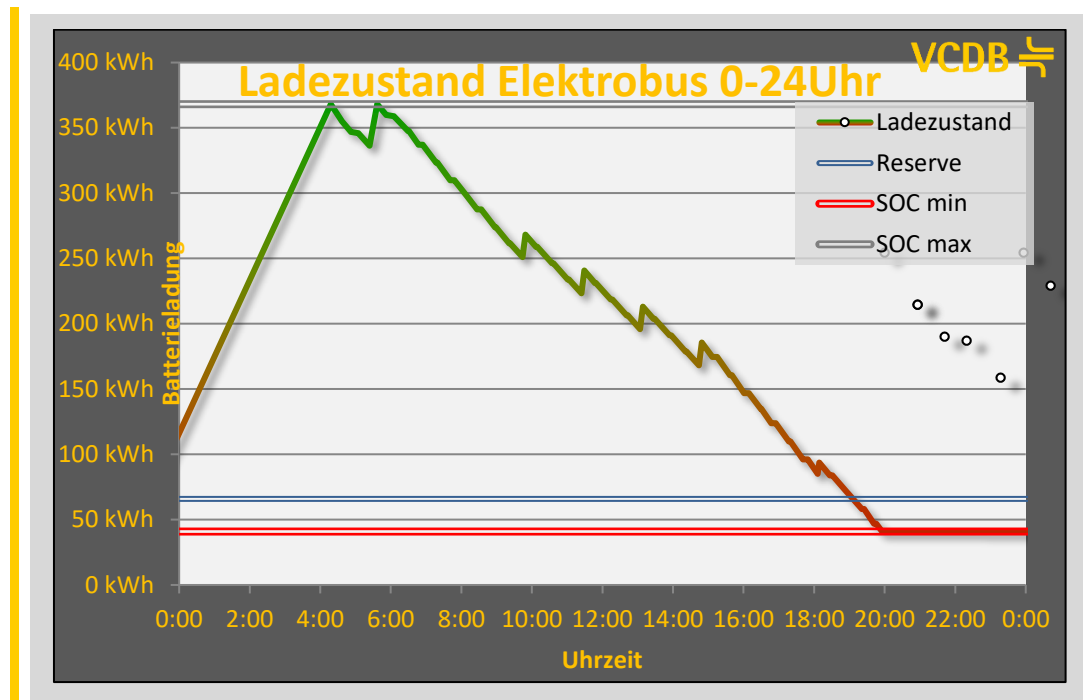


Abbildung 5.15: SOC-Verlauf Umlauf 95240, mit Verspätung, 1 LP EVE

Der Ladezustand fällt im Tagesverlauf stark ab. Infolge der hohen Verspätung, von bis zu 8 Minuten, fallen im Bereich des Vor- und Nachmittags zahlreiche Nachladungen am vorgesehenen Ladepunkt Everslohstraße aus. Dies führt dazu, dass der Ladezustand den SOC_{min} -Wert unterschreitet. Der kritische Ladezustandsbereich wird erreicht. Der Elektrobusbetrieb kann mit Verspätung und einem Ladepunkt nicht sichergestellt werden.

Energiebilanzierung

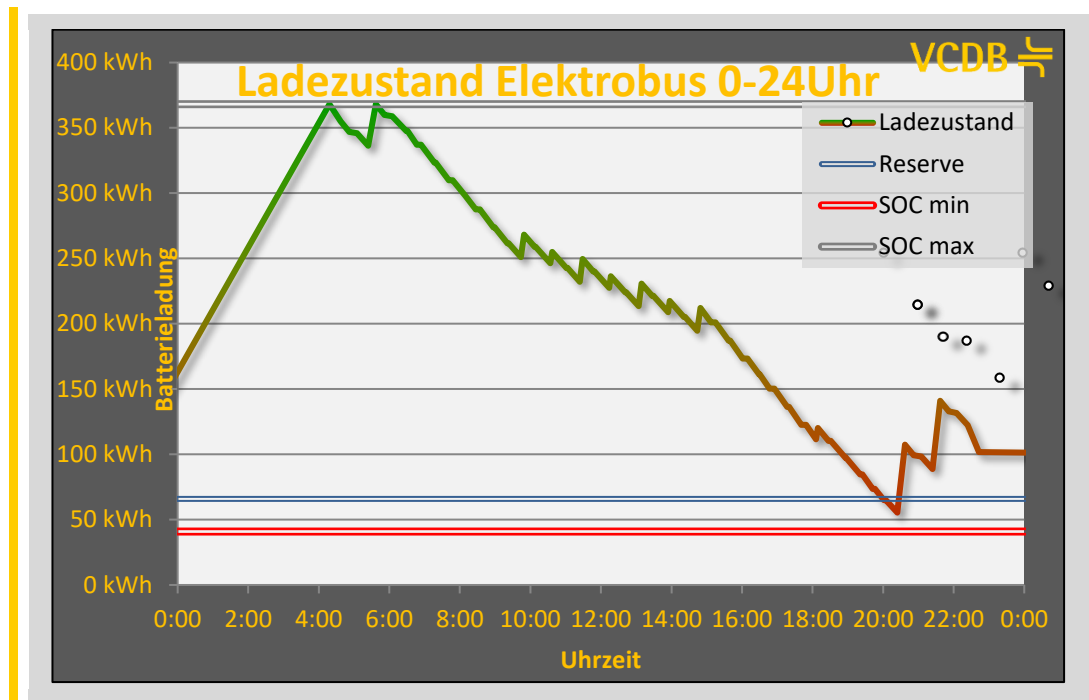


Abbildung 5.16: SOC-Verlauf Umlauf 95240, mit Verspätung, 2 LP EVE & AFR

Der Ladezustand fällt im Tagesverlauf stark ab. Durch das Nachladen an den Endpunkten Everslohstraße und Anne-Frank-Realschule kann sichergestellt werden, dass der Ladezustand den SOC_{min} -Wert nicht erreicht. Jedoch wird die Reserve unterschritten. Der kritische Ladezustandsbereich wird somit erreicht. Der Elektrobusbetrieb kann mit Verspätung und zwei Ladepunkten sichergestellt werden. Dennoch sollten zur Stabilisierung des E-Bus-Betriebs weitere Maßnahmen geprüft werden, um die Verspätungsanfälligkeit dieser Linien zu reduzieren.

Energiebilanzierung

Linie 953/961

- ▶ Linie mit einem Ladepunkt elektrifizierbar

Linie	Umlauf	bevorzugter Ladepunkt				bevorz. & zusätzl. Ladepunkt	
		ohne Verspätung		mit Verspätung		mit Verspätung	
		mach-bar?	SOC _{min}	mach-bar?	SOC _{min}	mach-bar?	SOC _{min}
953/961		SPC		SPC			
	42	ja	83,2 %	ja	77,4 %		

Tabelle 5.19: Bewertung GL-Einsatz ohne und mit Verspätung (SOLL-Daten)_
Linie 953/961

Folgende SOC-Verläufe wurden für den Umlauf 96142 ermittelt:

- ▶ Abbildung 5.17 ohne Verspätung und mit einem Ladepunkt an der Spechtstraße
- ▶ Abbildung 5.18: mit Verspätung und mit einem Ladepunkt an der Spechtstraße

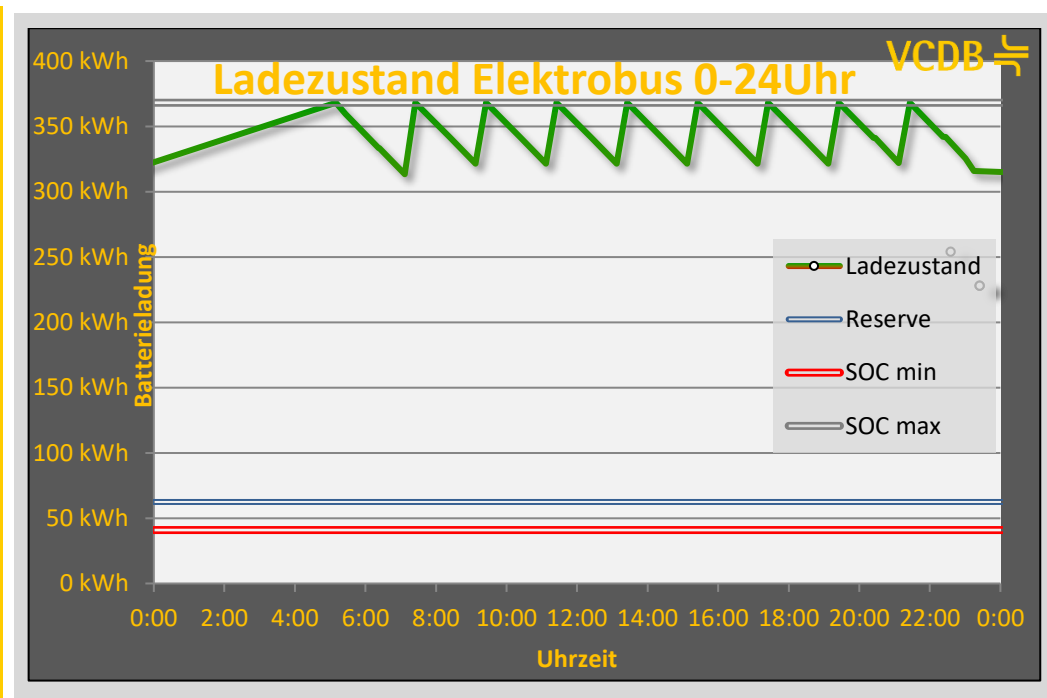


Abbildung 5.17: SOC-Verlauf Umlauf 96142, ohne Verspätung, 1 LP SPC

Energiebilanzierung

Der Ladezustand nimmt im Tagesverlauf leicht ab. Ein kritischer Ladezustandsbereich wird nicht erreicht. Nach jedem Ladevorgang am Endpunkt Spechtstraße wird der maximale Ladezustand erreicht. Der Elektrobusbetrieb kann ohne Verspätung und mit einem Ladepunkt sichergestellt werden.

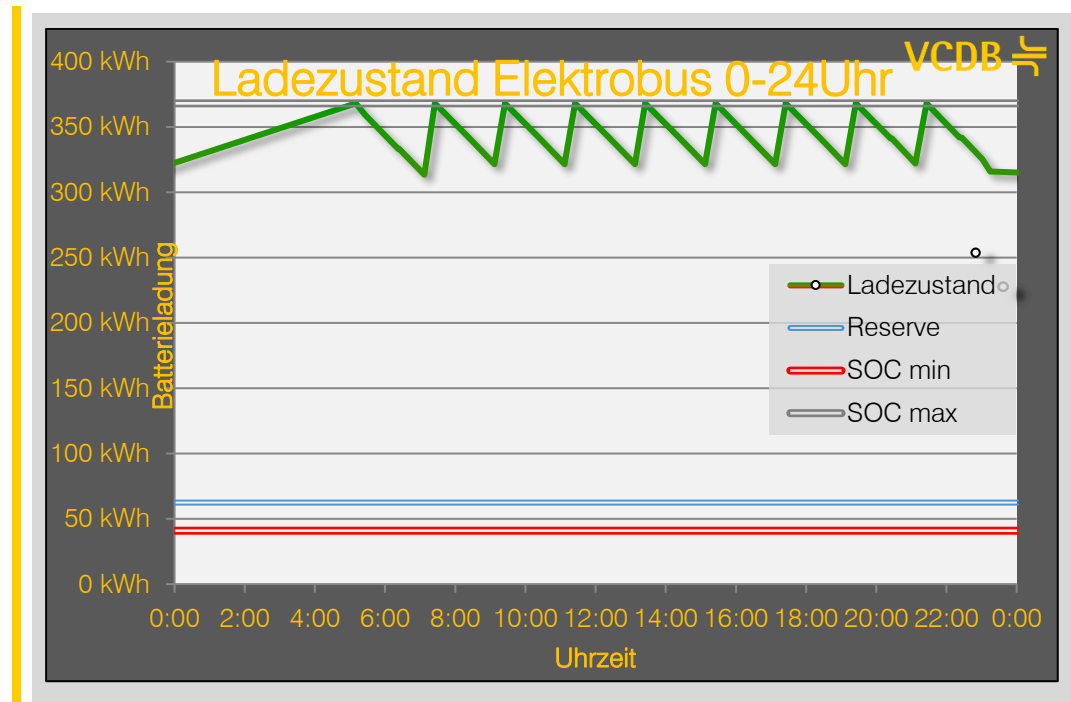


Abbildung 5.18: SOC-Verlauf Umlauf 96142, mit Verspätung, 1 LP SPC

Selbst im Verspätungsfall steht ausreichend Wendezeit am Endpunkt Spechtstraße zur Verfügung, so dass das hohe Ladezustandsniveau gehalten werden kann. Ein kritischer Ladezustandsbereich wird nicht erreicht. Ein zweiter Ladepunkt ist für den Elektrobusbetrieb nicht notwendig. Der Elektrobusbetrieb kann mit Verspätung und mit einem Ladepunkt sichergestellt werden.

Energiebilanzierung

Linie 955

- ▶ Linie mit zwei Ladepunkten elektrifizierbar

Linie	Um- lauf	bevorzugter Ladepunkt				bevorz. & zusätzl. Ladepunkt	
		ohne Verspätung		mit Verspätung		mit Verspätung	
		mach- bar?	SOC _{min}	mach- bar?	SOC _{min}	mach- bar?	SOC _{min}
955		AFR		AFR		AFR & HBG	
	01	ja	46,2 %	nein	0 %	ja	25,6 %

Tabelle 5.20: Bewertung GL-Einsatz ohne und mit Verspätung (SOLL-Daten)_Linie 955

Folgende SOC-Verläufe wurden für den Umlauf 95501 ermittelt:

- ▶ Abbildung 5.19: ohne Verspätung und mit einem Ladepunkt an der Anne-Frank-Realschule
- ▶ Abbildung 5.20: mit Verspätung und mit einem Ladepunkt an der Anne-Frank-Realschule
- ▶ Abbildung 5.21: mit Verspätung und mit zwei Ladepunkten an der Anne-Frank-Realschule und der Heinrich-Böll-Gesamtschule

Energiebilanzierung

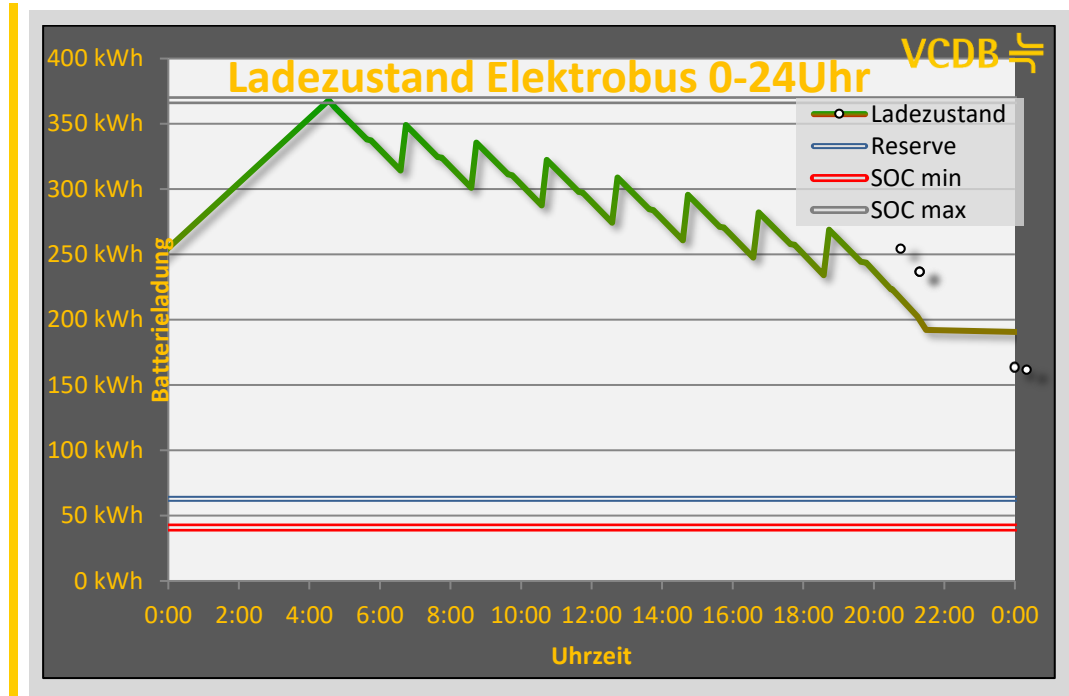


Abbildung 5.19: SOC-Verlauf Umlauf 95501, ohne Verspätung, 1 LP AFR

Der Ladezustand nimmt im Tagesverlauf leicht ab. Ein kritischer Bereich wird nicht erreicht. Der Elektrobusbetrieb kann ohne Verspätung und mit einem Ladepunkt am Endpunkt Anne-Frank-Realschule sichergestellt werden.

Energiebilanzierung

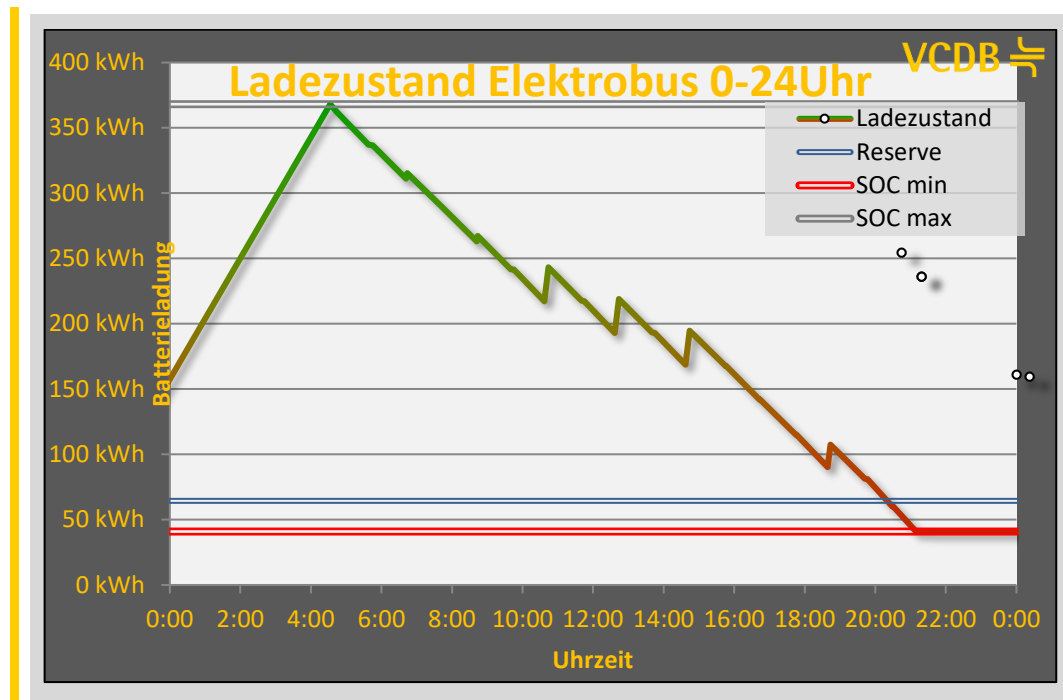


Abbildung 5.20: SOC-Verlauf Umlauf 95501, mit Verspätung, 1 LP AFR

Aufgrund der angenommenen Verspätungen, fallen Ladehalte am Ladepunkt Anne-Frank-Realschule im Vor- und Nachmittagsbereich aus, so dass der Ladezustand im Tagesverlauf stark abnimmt. Gegen Ende des Tages erreicht der Ladezustand den SOC_{min} . Der kritische Ladezustandsbereich wird erreicht. Der Elektrobusbetrieb kann ohne Verspätung und mit einem Ladepunkt nicht sichergestellt werden.

Energiebilanzierung

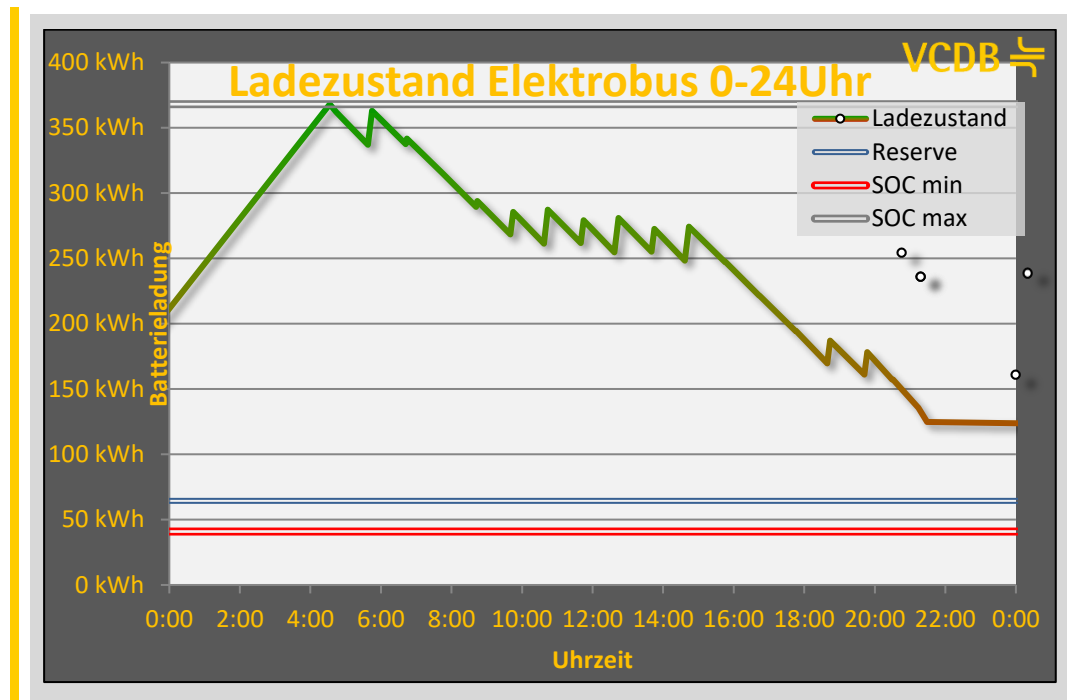


Abbildung 5.21: SOC-Verlauf Umlauf 95501, mit Verspätung, 2 LP AFR & HBG

Mit einem zweiten Ladepunkt am Endpunkt Heinrich-Böll-Gesamtschule können am Endpunkt Anne-Frank-Realschule ausfallenden Ladehalte ausgeglichen werden. Ein kritischer Ladezustandsbereich wird nicht erreicht. Der Elektrobusbetrieb kann mit Verspätung und mit zwei Ladepunkten sichergestellt werden.

Energiebilanzierung

Linie 956

- ▶ Linie mit einem Ladepunkt elektrifizierbar
- ▶ Optional Linie mit zweitem Ladepunkt ausstatten

Linie	Umlauf	bevorzugter Ladepunkt				bevorz. & zusätzl. Ladepunkt	
		ohne Verspätung		mit Verspätung		mit Verspätung	
		machbar?	SOC _{min}	machbar?	SOC _{min}	machbar?	SOC _{min}
956		WEH		WEH		WEH & GOE	
	02	ja	68,1 %	ja	29,3 %	ja	64,1 %

Tabelle 5.21: Bewertung GL-Einsatz ohne und mit Verspätung (SOLL-Daten) _Linie 956

Folgende SOC-Verläufe wurden für den Umlauf 95602 ermittelt:

- ▶ Abbildung 5.22: ohne Verspätung und mit einem Ladepunkt an der Wehrstraße
- ▶ Abbildung 5.23: mit Verspätung und mit einem Ladepunkt an der Wehrstraße
- ▶ Abbildung 5.24: mit Verspätung und mit zwei Ladepunkten an der Wehrstraße und der Goerdelerstraße

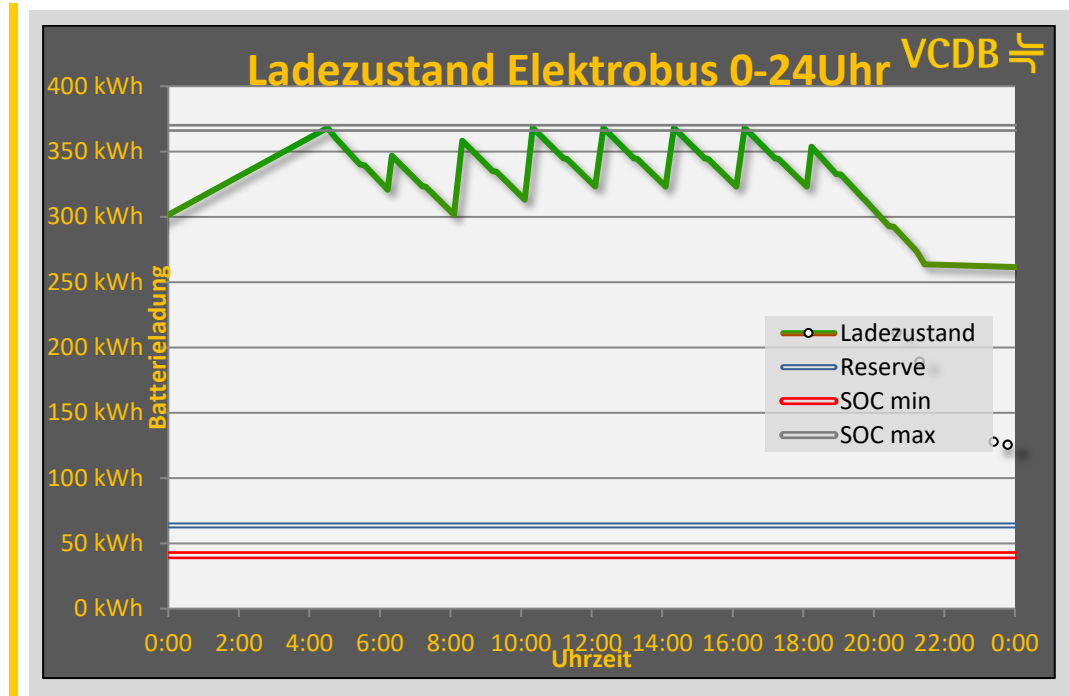


Abbildung 5.22: SOC-Verlauf Umlauf 95602, ohne Verspätung, 1 LP WEH

Der Ladezustand nimmt im Tagesverlauf leicht ab. Ein kritischer Ladezustandsbereich wird nicht erreicht. Der Elektrobusbetrieb kann ohne Verspätung und mit einem Ladepunkt am Endpunkt Wehrstraße sichergestellt werden.

Energiebilanzierung

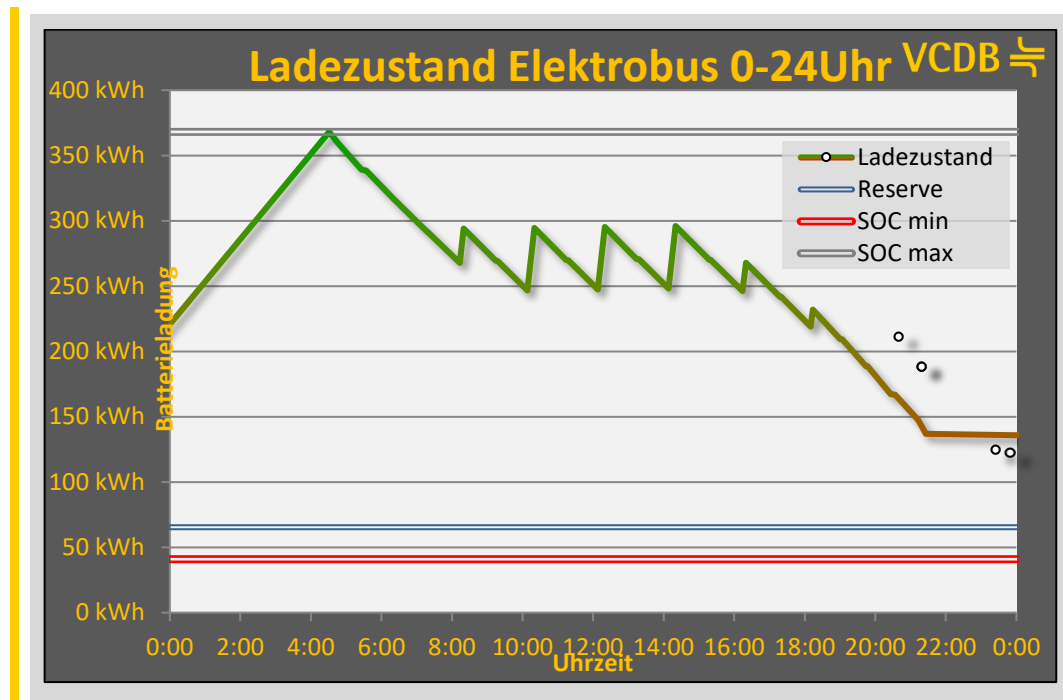


Abbildung 5.23: SOC-Verlauf Umlauf 95602, mit Verspätung, 1 LP WEH

Selbst im Verspätungsfall steht ausreichend Ladezeit am Endpunkt Wehrstraße zur Verfügung, so dass die Errichtung eines zweiten Ladepunktes nicht notwendig ist.

Wie sich die Errichtung eines zweiten Ladepunktes am Endpunkt Goerde-lerstraße auf den Ladezustandsverlauf auswirken würde, wird zusätzlich untersucht.

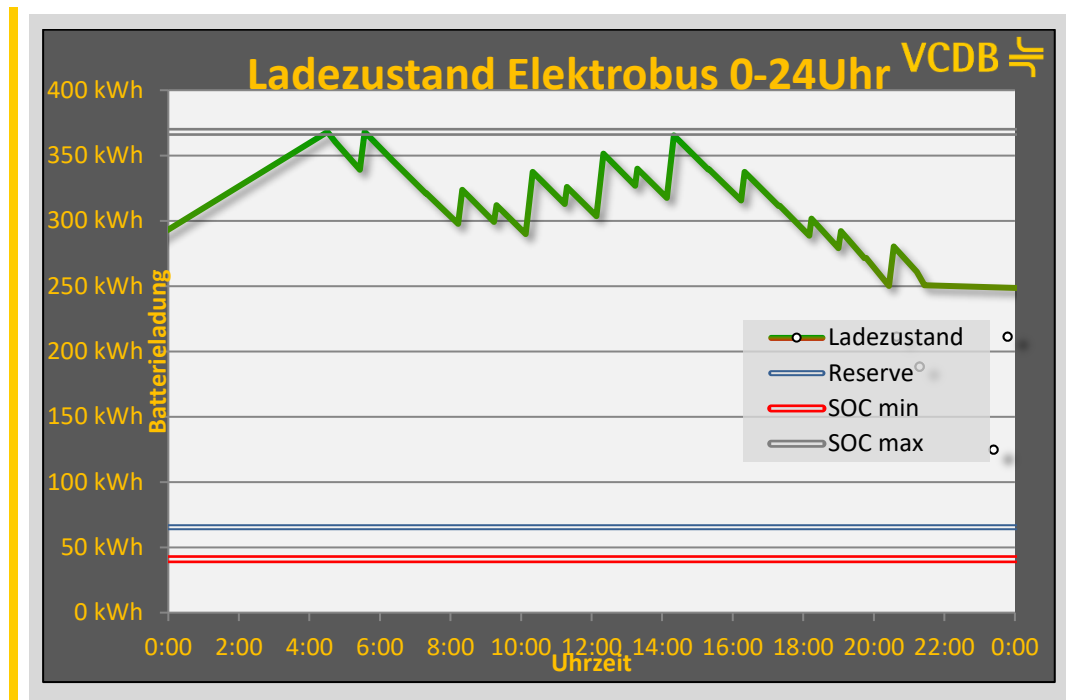


Abbildung 5.24: SOC-Verlauf Umlauf 95602, mit Verspätung, 2 LP WEH & GOE

Durch die Errichtung eines zweiten Ladepunktes am Endpunkt Goerdelerstraße kann der Ladezustand stabil im oberen Bereich gehalten werden.

Zusammenfassung

Die Untersuchungsergebnisse zeigen auf, dass die Verspätungslage maßgeblich die Umsetzbarkeit des Elektrobuseinsatzes mit Gelegenheitsladung bestimmt.

Können im Fall ohne Verspätung alle Umläufe mit jeweils einem Ladepunkt als Gelegenheitslader elektrifiziert werden, so ist dies im Fall mit Verspätung nur bei den Linien 953/961 möglich.

Da sich die Verspätungslage negativ auf den E-Bus-Betrieb auswirkt, kann optional über die Errichtung eines zweiten Ladepunktes entschieden werden.

Durch Hinzufügen eines zweiten Ladepunktes ist auch auf der Linie 955 der Elektrobusbetrieb abbildbar. Im Fall der Linie SB97/952 ist eine Elektrifizierung nur „knapp“ möglich. Es wird im Fall des Umlaufs 40 ein minimaler SOC von 4,3 % erreicht, was kritisch einzustufen ist. In diesem Fall könnte

Energiebilanzierung

ein zusätzlicher Ladepunkt am Endpunkt Sterkrade Bahnhof geringfügig Abhilfe schaffen. Dieser würde jedoch nur zu den Tagesrandzeiten durch die Linie 952 genutzt, da zu diesen Zeiten die Linie SB97 nicht verkehrt und die Linienverknüpfung aufgehoben ist.

An allen Endpunkten – bis auf den Standort Anne-Frank-Realschule – ist die Errichtung von einem Ladepunkt vorzusehen. An diesen Endpunkten kommt es zu keinen Linienüberschneidungen, so dass der spezifischen Linie die Wendezeiten zum Nachladen zur Verfügung stehen.

Lediglich am Endpunkt Anne-Frank-Realschule sind zwei Ladepunkte vorzusehen, da sich hier die Wendezeiten der Linien SB97 und 955 teilweise überschneiden.

In Tabelle 6.22 ist die erforderliche Anzahl an Ladepunkten bei ladepunktoffener Betrachtung, spezifisch für die Linienendpunkte zusammenfassend aufgeführt.

Endpunkt	Anzahl LP	Linien
Anne-Frank-Realschule	2	SB97/952 955
Everslohstraße	1	SB97/952
Wehrstraße	1	956
Heinrich-Böll-Gesamtschule	1	955
Spechtstraße	1	953/961

Tabelle 5.22: Erforderliche Ladepunkte bei ladepunktoffener Betrachtung

5.4.2 Ladepunktfeste Betrachtung

Im Folgenden soll betrachtet werden, welche Auswirkungen beim Elektrobusbetrieb entstehen bzw. welche Maßnahmen getroffen werden müssen, wenn als potentielle Ladepunkte die Endpunkte Anne-Frank-Realschule und Wehrstraße priorisiert werden.

Linie SB97/952

Aus der vorherigen Betrachtung wird deutlich, dass für den Verspätungsfall Ladepunkte an zwei Endstellen notwendig sind. So ist neben dem Standort

Energiebilanzierung

Anne-Frank-Realschule auch der Endpunkt Everslohstraße mit Ladeinfrastruktur auszurüsten.

Da trotz dieser Maßnahme im Falle des Umlaufs 95240 ein Unterschreiten der Reserve auftritt, sollten weitere Maßnahmen geprüft werden, um die Verspätungsanfälligkeit dieser Linien zu reduzieren.

Einen geringen Einfluss hat die Nutzung eines Ladepunktes am Bahnhof Sterkrade, jedoch würde eine Nachladung an diesem Ladepunkt zum Ausbleiben der Unterschreitung der Reserve führen. Nachladungen würden nur in den Schwachlastzeiten stattfinden, zu denen die Linie SB97 nicht verkehrt. Ob eine Nutzung des vorhandenen Ladepunktes möglich ist, wurde nicht überprüft.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, ein zusätzliches Fahrzeug auf den Linien SB97/952 einzusetzen, um somit die Wendezeit an den Endpunkten deutlich zu erhöhen.

- ▶ Maßgebend: 1 LP Anne-Frank-Realschule
- ▶ Zusätzlich erforderlich: 1 LP Everslohstraße
- ▶ Weitere mögliche Maßnahmen
 - ▶▶ Fahrplanstabilisierung zur Verringerung der Verspätungslage
 - ▶▶ Nutzung des Ladepunktes am Bahnhof Sterkrade
 - ▶▶ Einsatz eines zusätzlichen Fahrzeugs

Linie 953/961

Um einen Elektrobusbetrieb mit Gelegenheitsladern mit einem Ladepunkt an der Wehrstraße zu ermöglichen, muss eine betriebliche Maßnahme angewendet werden. Die Fahrplanung muss dahingehend verändert werden, dass die langen Wendezeiten vom Endpunkt Spechtstraße zum Endpunkt Wehrstraße verschoben werden. Die Untersuchung hat gezeigt, dass diese Wendezeit ausreichend ist, um die beiden Linien mit Gelegenheitsladern zu betreiben.

- ▶ Maßgebend: 1 LP Wehrstraße
- ▶ Zusätzlich erforderlich: Wendezeitverschiebung auf den Endpunkt Wehrstraße

Energiebilanzierung

Linie 955

Im Verspätungsfall ist ein Ladepunkt am Endpunkt Anne-Frank-Realschule nicht ausreichend, sodass ein weiterer am Endpunkt Heinrich-Böll-Gesamtschule errichtet werden muss. Alternativ ist auch der Einsatz eines zusätzlichen Fahrzeuges zu betrachten, um die Wendezeit am Endpunkt Anne-Frank-Realschule zu erhöhen.

- ▶ Maßgebend: 1 LP Anne-Frank-Realschule
- ▶ Zusätzlich erforderlich: 1 LP Heinrich-Böll-Gesamtschule
- ▶ Weitere mögliche Maßnahme
 - ▶▶ Einsatz eines zusätzlichen Fahrzeuges

Linie 956

Für den Betrieb der Linie 956 mit Gelegenheitsladern ist ein Ladepunkt am Endpunkt Wehrstraße ausreichend. Ein zusätzlicher Ladepunkt an der Goerderlerstraße kann optional errichtet werden.

- ▶ Maßgebend: 1 LP Wehrstraße

Auswertung

In Tabelle 5.23 ist zusammenfassend die Umsetzungsempfehlung zur Abbildung des E-Bus-Betriebs auf den betrachteten Linien aufgeführt. Dies basiert auf der Annahme, dass folgende betriebliche Maßnahmen zulässig sind:

- ▶ Favorisierung der Ladepunkte AFR und WEH
- ▶ Ladeleistung je Ladepunkt 300 kW
- ▶ Verlagerung von Wendezeiten

Energiebilanzierung

EP	Linien	Ladepunkt (LP)	notwendige betriebliche Maßnahme	Kommentar
AFR	SB97/952	• 1 LP	• Prüfung erforderlich: - Zwischenladung an Sterkrade Bahnhof - Verlagerung der WZ - Reduzierung der Verspätung	• knappe Unterschreitung der Reserve, erfordert ggf. betriebl. Maßnahmen • WZ überschneiden sich
	955	• 1 LP		
WEH	953/961	• 1 LP	• Verlagerung der WZ von SPC auf WEH	• WZ überschneiden sich vmtl.
	956	• 1 LP		
HBG	955	• 1 LP		
SPC	953/961	• 0 LP		• WZ wurden von SPC auf WEH verschoben
GOE	956	• 0 LP		
EVE	SB97/952	• 1 LP		

Tabelle 5.23: Umsetzungsempfehlung bei ladepunktfester Betrachtung

Bewertung

Um die 15 Umläufe der Linien SB97/952, 953/961, 955 und 956 auf Elektrobusbetrieb mit Gelegenheitsladern umzustellen, ist es notwendig, dass neben der Errichtung von Ladeinfrastruktur weitere betriebliche Maßnahmen durchgeführt werden müssen.

Für den Betrieb von Gelegenheitsladern spielt vor allem die Verspätungslage eine große Rolle. Aus diesem Grund sollten Wendezeiten asymmetrisch auf die Endpunkte verteilt werden. So kann ggf. die Ladeinfrastruktur auf einen Endpunkt konzentriert werden, damit ein Großteil der Wendezeit zum Nachladen genutzt werden kann. Die dadurch entstehenden Nachteile wurden in Abschnitt 9.1.2.2 diskutiert.

Energiebilanzierung

Falls ein Ladepunkt an einem Endpunkt nicht für den Gelegenheitsladerbetrieb ausreichend ist, muss abgewägt werden, ob weitere Ladeinfrastruktur installiert oder ein zusätzliches Fahrzeug eingesetzt werden muss.

Sinnvoll ist es, dort Ladeinfrastruktur vorzusehen, wo mehrere Linien enden, da so einige Komponenten der Ladeinfrastruktur besser ausgelastet sind. Auch wenn dafür mehrere Ladepunkte zu errichten sind, können andere Anlagen wie Transformator oder Schaltanlagen mehrfach genutzt werden.

5.4.3 Ladepunktfeste Betrachtung, mit geänderter Verspätungslage

Unter der Maßgabe, dass zunächst die Endpunkte Anne-Frank-Realschule (AFR) und Wehrstraße (WEH) mit Ladepunkten für das Nachladen der 15 Solo-Elektrobusse ausgestattet werden, sollen im Folgenden Optionen und Maßnahmen für die Umsetzung aufgezeigt werden. Vorerst ist eine Errichtung von weiteren Ladepunkten an den Endpunkten Everslohstraße (EVE) und Heinrich-Böll-Gesamtschule (HBG) nicht vorgesehen.

Den Berechnungen (siehe 5.4.1 und 5.4.2) wurde die maximale Verspätungslage von 8 Minuten zugrunde gelegt. Nach Einschätzung der STOAG sind Verspätungen bis zu 8 Minuten möglich, jedoch nicht als durchgängige Verspätung über den Tagesverlauf anzusetzen. Dies würde den Betriebsablauf nicht realitätsnah abbilden und demnach zu Fehleinschätzungen des Elektrobusbetriebs führen.

Es soll untersucht werden, ob bei angepasster Annahme der Verspätungslage, auf die Ladepunkte Everslohstraße und Heinrich-Böll-Gesamtschule verzichtet werden kann. Zudem soll ermittelt werden, wie viele Ladehalte ausfallen können, ohne den Elektrobusbetrieb zu gefährden.

Herangehensweise

Die Verspätungsannahmen werden entsprechend der generellen Annahmen bei der Betrachtung des Gelegenheitsladereinsatzes (vgl. 5.3) angepasst. Die Verspätungslage setzt sich demnach aus einer angenommenen Verspätung von 2 Minuten und einer Kontaktierungszeit von 1 Minute zusammen. Zudem wird eine 80-prozentige Nutzung der verfügbaren Ladezeit angenommen.

Das Ausfallen eines Ladehalts wird durch eine einmalige Verspätung, die der Wendezeit entspricht, simuliert.

Ergebnis

Linie SB97/952

Auch bei einer Änderung der Verspätungsannahme ist die Wendezeit am Endpunkt AFR nicht ausreichend, um eine ausreichende Nachladung zu garantieren. Dies wird in der Abbildung 5.25 deutlich.

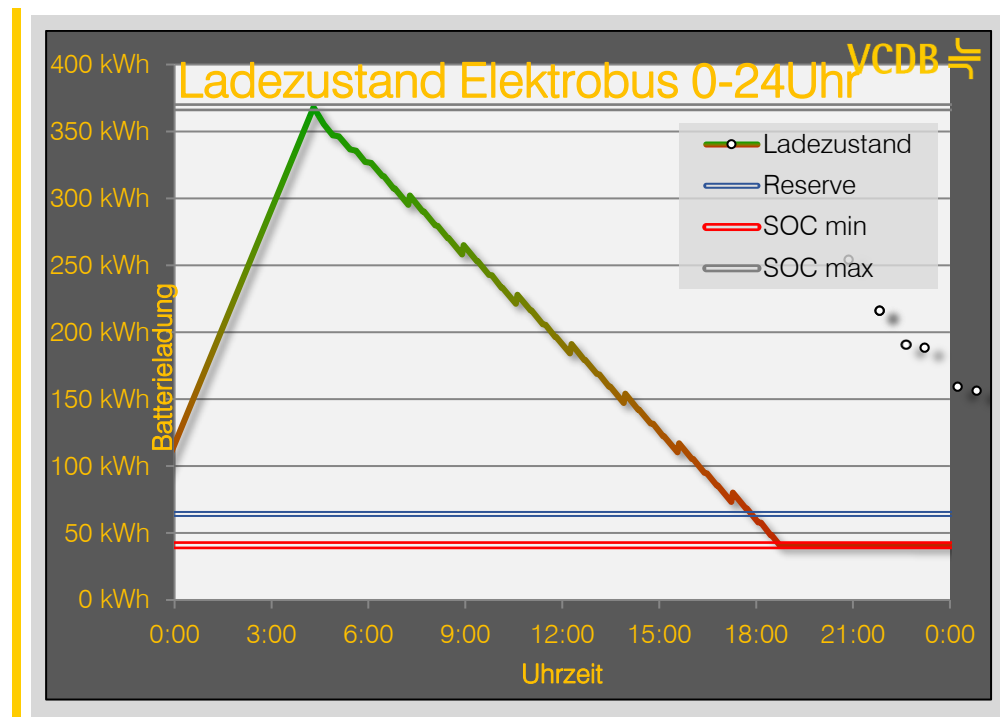


Abbildung 5.25: SOC-Verlauf Umlauf 95240, 1 LP AFR, mit Verspätung (2+1 min; 80 %)

Auch eine Erhöhung der Ladeleistung auf 450 kW (brutto) führt nicht zu dem gewünschten Ergebnis (hier nicht durch eine Abbildung dargestellt).

Daraufhin wurde eine Änderung des Fahrplans (NF – neuer Fahrplan) vorgenommen. Die Wendezeit wurde zum Endpunkt AFR verlagert, am Endpunkt EVE bleibt jedoch eine Restwendezeit von 2 Minuten. So werden am Endpunkt AFR Wendezeiten von 10 Minuten und am Endpunkt EVE von 2 Minuten erreicht. Dies wirkt sich wie folgt auf den GL-Einsatz aus (Abbildung 5.26):

Energiebilanzierung

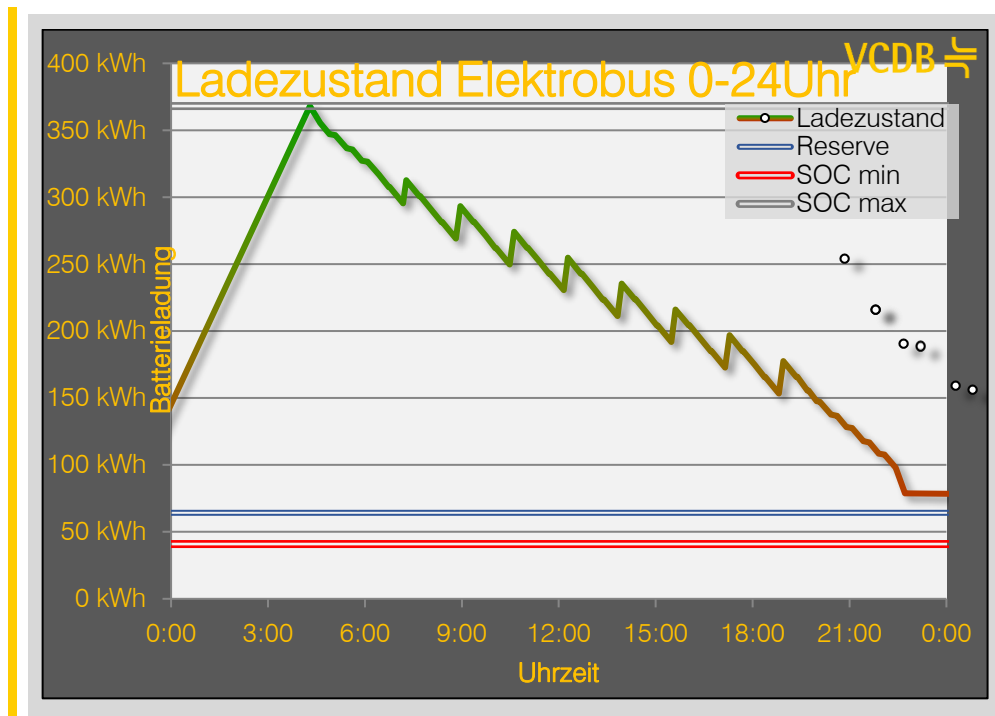


Abbildung 5.26: SOC-Verlauf Umlauf 95240NF, 1 LP AFR, mit Verspätung (2+1 min; 80 %)

Durch die Verschiebung der Wendezeit kann ein GL-Einsatz auf der Linie SB97/952 ermöglicht werden. Es ist jedoch festzustellen, dass der SOC im Tagesverlauf stark abnimmt und beim Einrücken in den Betriebshof knapp über der Reserve ist.

In der Untersuchung, wie sich der Ladezustand bei Ausfall eines oder mehrerer Ladehalte verhält, wurde Folgendes festgestellt. Bei Ausfall eines Ladehaltes sinkt der SOC beim Einrücken unter die Reserve, beim Ausfall eines zweiten Ladehaltes wird der SOC_{min} unterschritten; somit ist ein vollständiger Tageseinsatz nicht mehr möglich. Dies ist in der Tabelle 5.24 zusammengefasst.

Ausfall von Ladehalten	SOC Einrücken	Bewertung
0	11,6 %	unkritisch
1	3,0 %	kritisch
2	-5,5 %	Einsatz nicht möglich

Tabelle 5.24: Ausfall von Ladehalten Linie SB97/952

Energiebilanzierung

Linie 953/961

Wie in 5.4.1 gezeigt, ist der GL-Einsatz auf den Linien 953/961 mit Annahme einer hohen Verspätungslage als unkritisch einzustufen. Voraussetzung bleibt die Verschiebung der Wendezeiten auf den Endpunkt Wehrstraße.

Der Ausfall von Ladehalten ist in Tabelle 5.25 dargestellt. Der Ausfall von mehreren Ladehalten ist als unkritisch einzustufen.

Ausfall von Ladehalten	SOC Einrücken	Bewertung
0	83,5 %	unkritisch
1	72,6 %	unkritisch
2	54,7 %	unkritisch
3	36,7 %	unkritisch

Tabelle 5.25: Ausfall von Ladehalten Linie 953/961

Energiebilanzierung

Linie 955

Wie durch Abbildung 5.27 ersichtlich wird, ist der GL-Einsatz auf der Linie 955 mit einem Ladeplatz am Endpunkt AFR darstellbar.

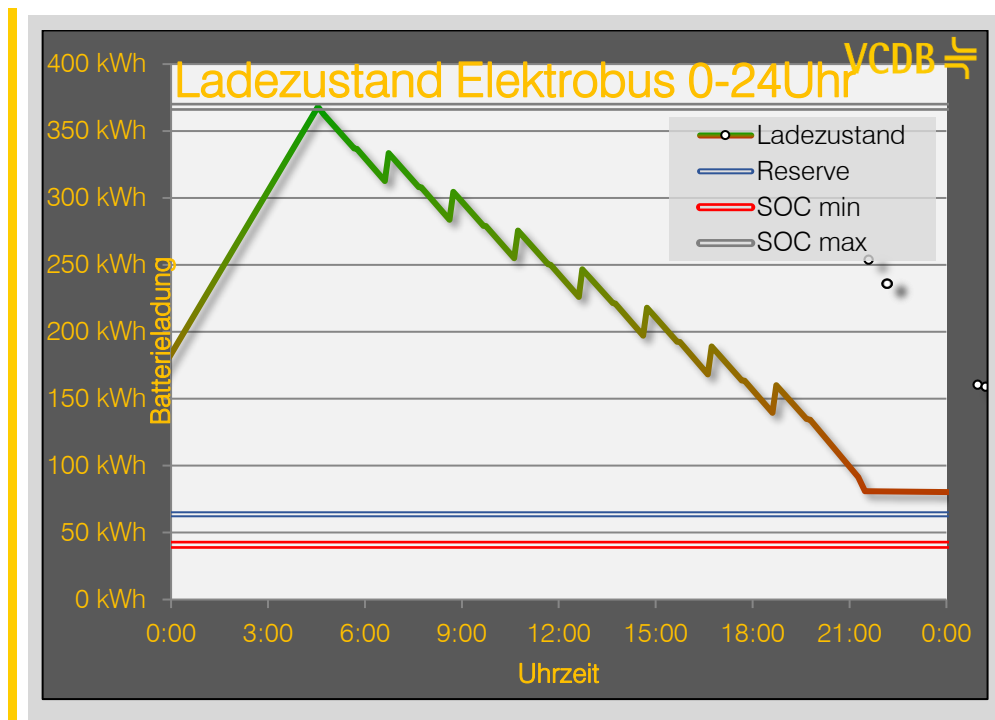


Abbildung 5.27: SOC-Verlauf Umlauf 95501, 1 LP AFR, mit Verspätung (2+1 min; 80 %)

Der Ausfall eines Ladehaltes führt zum Unterschreiten der Reserve. Fällt ein zweiter Ladehalt aus, so ist ein Betrieb über den gesamten Tagesverlauf nicht möglich. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 5.26 zusammengefasst.

Ausfall von Ladehalten	SOC Einrücken	Bewertung
0	12,2 %	unkritisch
1	5,0 %	kritisch
2	-2,3 %	Einsatz nicht möglich

Tabelle 5.26: Ausfall von Ladehalten Linie 955

Linie 956

Wie in 5.4.1 gezeigt, ist der GL-Einsatz auf der Linie 956 mit Annahme einer hohen Verspätungslage als unkritisch einzustufen. In der weiterführenden Untersuchung, wie viele Ladehalte entfallen können, kann Folgendes festgestellt werden. Es können bis zu zwei Ladehalte ausfallen, beim Dritten ist ein Betrieb nicht mehr möglich (siehe dazu Tabelle 5.27).

Ausfall von Ladehalten	SOC Einrücken	Bewertung
0	38,8 %	unkritisch
1	25,4 %	unkritisch
2	12,1 %	unkritisch
3	-1,2 %	Einsatz nicht möglich

Tabelle 5.27: Ausfall von Ladehalten Linie 956

5.4.4 Festlegungen der STOAG nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie

Im Zuge der Erarbeitung der Machbarkeitsstudie wurde der Endpunkt Anne-Frank-Realschule als geeigneter Ladestandort ermittelt und zur Nachladung der Linien SB97/952 und 955 herangezogen. Durch die STOAG wurde nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie beschlossen, dass der Endpunkt Anne-Frank-Realschule vorerst nicht als Ladepunkt realisiert werden kann. Daraus ergeben sich folgende Änderungen, die in den Ausführungen dieser Machbarkeitsstudie nicht berücksichtigt wurden:

- ▶ Die Umstellung der Linie 955 auf Elektrobusbetrieb erfolgt nicht in Umsetzungsstufe 1, sondern zu einem späteren Zeitpunkt (voraussichtlich in Umsetzungsstufe 2).
- ▶ Alternativ zum Endpunkt Anne-Frank-Realschule sollen die Endpunkte Everslohstraße (Linie SB97/952, Stufe 1) und Heinrich-Böll-Gesamtschule (Linie 955, Stufe 2) als Ladepunkte ausgebaut werden.

6 Betriebliche Bewertung

Auf Basis der gestellten Anforderungen an den Elektrobusbetrieb und den ermittelten Untersuchungsergebnissen, wird ein Betriebskonzept erarbeitet, welches als Grundlage für weiterführende Planungen im Zuge der E-Bus-Ausweitung herangezogen werden kann.

Um eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die systematische Umstellung zu erhalten, wurde sowohl der VL- als auch GL-Einsatz unter der Maßgabe verschiedener Eingangsgrößen und Rahmenbedingen im Gesamtnetz abgebildet. Sollten konkrete Umstellungsschritte eingeleitet werden, wird empfohlen, eine detaillierte Umsetzungsplanung durchzuführen.

Generell favorisiert die STOAG den Einsatz von Vollladern. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde festgestellt, dass ein ausschließlicher VL-Einsatz unter den betrieblichen Bedingungen nicht abbildbar ist.

Gezielte Anpassungen im Betrieb sind notwendig, um den VL-Betrieb sicherstellen zu können. Eine geeignete Maßnahme stellt die Verkürzung, d. h. Teilung von Umläufen dar, was einen Fahrzeugmehrbedarf von bis zu 50 % erfordert.

Vorausgesetzt, dass ein Großteil der Wendezeit zum Nachladen genutzt werden kann, d. h. Ladeinfrastruktur an jedem Endpunkt errichtet werden kann, ist ein Gelegenheitsladereinsatz umsetzbar.

6.1 Betriebskonzept

Das Betriebskonzept soll die betrieblichen (flexibler Betrieb, geringe betriebliche Anpassungen, bevorzugter VL-Einsatz), technischen (einheitliche Fahrzeugkonfiguration) und wirtschaftlichen (geringe Mehraufwendungen) Anforderungen der STOAG an den Elektrobusbetrieb berücksichtigen.

Das Konzept sieht einen Mischbetrieb von Voll- und Gelegenheitsladern vor.

Die Festlegung der Ladepunkte erfolgte nach erster Einschätzung der Ladestandorte auf Umsetzungsfähigkeit (vgl. Anhang 6). Die Ladepunkte sollen an wenigen Stellen in der Stadt konzentriert und durch möglichst viele Linien bedient werden, so dass eine hohe Auslastung der Ladepunkte erzielt werden kann.

Betriebliche Bewertung

Ein einheitliches Fahrzeugkonzept soll zum einen die betriebliche Flexibilität beim Fahrzeugeinsatz erhöhen. Zum anderen können Reservevorhaltungen flexibel gestaltet werden. Die Werkstatt ist entsprechend auch nur auf ein Fahrzeug- und Ladeinfrastruktursystem auszulegen.

Die Festlegung der als Voll-lader bzw. Gelegenheitslader zu betreibenden Umläufe folgt folgendem Vorgehen:

- ▶ **Priorität 1: VL 1**
Auswahl aller Umläufe, die ohne betriebliche Anpassungen als Voll-lader abbildbar sind.
- ▶ **Priorität 2: GL 1**
Auswahl aller Umläufe, die als Gelegenheitslader die zwei vorhandenen Ladestandorte Sterkrade Bahnhof und Neumarkt sowie die geplanten Ladestandorte Wehrstraße und Anne-Frank-Realschule nutzen.
- ▶ **Priorität 3: GL 2**
Auswahl aller Umläufe, die als Gelegenheitslader die im Rahmen der Ladestandortuntersuchung als günstig eingeschätzten Ladestandorte Falkestraße, Holten Bahnhof und Fröbelplatz nutzen.
- ▶ **Priorität 4: VL 2**
Auswahl aller restlichen Umläufe, an denen betriebliche Anpassungen – wie zusätzlicher Fahrzeugeinsatz – vorzunehmen sind, um den VL-Einsatz abbilden zu können.

Die Zuordnung der Umläufe entsprechend der Prioritäts-Stufen 1 bis 4 ist im Anhang 3 aufgeführt.

6.1.1 **Priorität 1 (VL1) Voll-lader ohne betriebliche Anpassungen**

Alle Umläufe, die gemäß Abschnitt 5.2.4 ohne betriebliche Anpassungen als VL betrieben werden können, entsprechen den nach Priorität 1 eingestufteten VL-Umläufen. Dies sind vor allem Umläufe mit geringer Laufleistung. Bei Umstellung dieser Umläufe auf Elektrobusbetrieb sind keine Anpassungen an der Fahr- und Umlaufplanung notwendig. Eine Errichtung von Ladeinfrastruktur auf der Strecke ist nicht vorgesehen. Der Umstellungsaufwand wird als gering eingeschätzt.

Betriebliche Bewertung

6.1.2 **Priorität 2 (GL1) Gelegenheitslader mit Ladepunkten an den Endpunkten OSB, NMK, AFR, WEH**

Um den GL-Betrieb auf den Linien SB97/952, 953/961, 955, 956 sicherstellen zu können, sieht die STOAG an den Endpunkten Anne-Frank-Realschule (AFR) und Wehrstraße (WEH) jeweils zwei Ladepunkte vor. Im Rahmen der ladepunktfesten Untersuchung wurde in 6.4.2 ermittelt, dass zur Abbildung des GL-Betriebs, unter Berücksichtigung von Verspätungen, zwei weitere Ladepunkte an den Endpunkten Everslohstraße (EVE) und Heinrich-Böll-Gesamtschule (HBG) vorzusehen sind.

In Kapitel 6.4.3 zur ladepunktfesten Betrachtung mit geänderten Verspätungslage wurde eine realistischere Verspätungslage zugrunde gelegt. Durch eine Anpassung des Fahrplans für die Linien SB97/952 sowie 953/961 kann die Verschiebung von ausreichend Wendezeit von der Everslohstraße (EVE) zur Anne-Frank-Realschule (AFR) für die Linie SB957/952 sowie von der Spechtstraße (SPC) zur Wehrstraße (WEH) für die Linie 953/961 realisiert werden. Dadurch werden die in 6.4.2 ermittelten weiteren Ladepunkt an den Endpunkten Everslohstraße (EVE) und Heinrich-Böll-Gesamtschule (HBG) obsolet. Somit können diese 15 Umläufe mit jeweils 2 zu errichtenden Ladepunkten an den Endpunkten Anne-Frank-Realschule (AFR) und Wehrstraße (WEH) umgestellt werden.

Für die Betrachtung aller Umläufe der Priorität 2 (GL 1) und der dafür benötigten Ladepunkte wurde das Nutzen der vorhandenen Ladestandorte Sterkrade Bahnhof (OSB) und Neumarkt (NMK) in die Betrachtung mit einbezogen.

In Tabelle 6.1 sind die gemäß Priorität 2 (GL1) eingestufteten Umläufe aufgeführt. Diese umfassen sowohl die 15 Umläufe, die bereits in Kapitel 6.4 gesondert untersucht wurden als auch weitere 15 Umläufe auf anderen Linien, die der Priorität 2 (GL 1) zugeordnet wurden.

Die ermittelte Anzahl der vorzusehenden Ladepunkte ist ein Schätzwert, der anhand der Takte für jede Linie ermittelt wurde. Hierbei wurden folgende Annahmen getroffen: 20-min-Takt – 1 LP; 30-min-Takt – 0,75 LP; 60-min-Takt – 0,5 LP.

Betriebliche Bewertung

Endpunkt		Linien	Umläufe	Anzahl LP
Anne-Frank-Real-schule	AFR	136, 935, 939, 955, SB97, 995	09742, 13601, 13602, 41609, 93502, 93503, 93504, 93508, 93901, 93902, 95240, 95241, 95243, 95244, 95407, 95501, 95502, 99501, 99502	136: 0,5 LP 935: 0,5 LP 939: 0,5 LP 955: 0,5 LP SB97: 1 LP 995: 0,5 LP gesamt: 4 LP
Sterkrade Bahnhof	OSB	954, 962, 979, 935	41609, 95401, 95402, 95406, 95407, 95410, 96201, 97901, 97902, 97903, 97904, 99505	935: 0,5 LP 954: 0,75 LP 962: 0,5 LP 979: 1 LP gesamt: 3 LP (1 LP bereits vorhanden)
Neumarkt	NMK	966	96601	1 LP (bereits vorhanden)
Wehrstraße	WEH	953/961, 956	95341, 95601, 95602, 95603, 95604, 96140, 96142, 96143	953: 0,5 LP 961: 0,5 LP 956: 0,75 LP gesamt: 2 LP

Tabelle 6.1: Linien und Umläufe Priorität 2 (GL1)

6.1.3 Priorität 3 (GL2) Gelegenheitslader mit Ladepunkten an den Endpunkten FAL, FRÖ und HOB

Endpunkte, die von vielen Linien bzw. Umläufen frequentiert werden, wurden in den Untersuchungen als weitere Ladestandorte in die GL-Betrachtung einbezogen. Auf Basis der durchgeführten einer Liniennetz- und Fahrplananalyse wurden Endpunkte Falkestraße (FAL), Fröbelplatz (FRÖ) und Holten Bahnhof (HOB) als Ladestandorte identifiziert. Gemäß Priorität 3 wurden die Umläufe als GL-Umläufe ermittelt, die eine Nachladung an diesen Endpunkten vorsehen.

Betriebliche Bewertung

In Tabelle 6.2 sind die gemäß Priorität 3 (GL2) eingestuften Umläufe aufgeführt.

Endpunkt		Linien	Umläufe	Anzahl LP
Falkestraße	FAL	SB92/ SB98, 976	09202, 09204, 09205, 09214, 09217, 09308, 09310, 09311, 09313, 09316, 09321, 09803, 09806, 09807, 09809, 09812, 09815, 09819, 42620, 97601, 97602, 97603, 97604, 97605, 97606, 97607, 97608	SB92: 1 LP SB98: 1LP 976: 1LP gesamt: 3 LP
Holten Bahnhof	HOB	960	96001, 96002, 96003, 96004, 96005, 96006, 96007, 96018,	960: 1 LP
Fröbelplatz	FRÖ	SB92/ SB93/ SB98, 143	14301, 14302, 14303, 14304, 14340, 14371	SB92: 1 LP SB93: 1 LP SB98: 1 LP 143: 1LP gesamt: 4 LP

Tabelle 6.2: Linien und Umläufe Priorität 3 (GL2)

6.1.4 Priorität 4 (VL2) Vollader mit Teilung der Umläufe

Alle übrigen Umläufe, d. h. die Umläufe, die nicht nach den Prioritäten 1 bis 3 (VL1, GL1, GL2) eingestuft werden konnten, sind der Priorität 4 (VL2) zuzuordnen. Diese Umläufe würden sich generell auch als GL-Umläufe eignen (siehe 5.3), jedoch soll auf die Errichtung von weiterer Ladeinfrastruktur an den Endpunkten verzichtet werden. Demnach sind diese Umläufe als VL zu betreiben.

Diese Umläufe können nur mit geeigneten betrieblichen Anpassungen als VL elektrifiziert werden, gemäß den Ausführungen in Abschnitt 5.2.5. Die

Betriebliche Bewertung

vorgesehene Verkürzung (Teilung) der Umläufe erfordert eine Änderung der Umlaufplanung, welche Zwischenladungen im Betriebshof während des Betriebseinsatzes berücksichtigt. Die zusätzliche Ein- und Ausrückefahrten führen zu einer Erhöhung der Laufleistung um 4 % und der Einsatzdauer um 3 %. Der Fahrzeugmehrbedarf für die zusätzlichen Umläufe entspricht 48 %.

6.1.5 Umlaufspezifische Kenndaten nach VL- und GL-Zuordnung

Einen Gesamtüberblick über die Zuordnung aller Umläufe entsprechend ihrer Einstufung nach VL- und GL-Betrieb (ohne Teilung VL2-Umläufe) bietet Tabelle 6.3.

Anzahl Umläufe	VL1	GL1	GL2	VL2	Gesamt
STOAG	25	14	38	21	98
SUB	9	9	0	12	30
FREMD	31	7	1	21	60
Gesamt	65	30	39	54	188

Tabelle 6.3: Anzahl Umläufe nach VL- und GL-Einstufung (ohne Teilung Umläufe VL2)

6.2 Umsetzungsstufen

Als Grundlage für das Umsetzungskonzept wurden Umsetzungsstufen definiert, die die schrittweise Umstellung des Dieselbusbetriebs und Elektrobusbetrieb darstellen. In den Umsetzungsstufen werden Anzahl und Art der geplanten Fahrzeuge und entsprechender Ladeinfrastruktur in zeitlich definierten Abschnitten festgelegt. Betrachtet werden die Umläufe der STOAG und von Wohlgemuth, da diese mit den Fahrzeugen der STOAG bedient werden. Die Umsetzungsstufen werden als Betrachtungsgrundlage für die ökonomische Bewertung und die herangezogen.

Folgende drei Umsetzungsstufen wurden definiert:

- ▶ Stufe 1: 15 Solobusse als Gelegenheitslader
- ▶ Stufe 2: 68 Solobusse – Festlegung Laderegime nach Priorität 1 bis 4
- ▶ Gesamtumstellung: 68 Solobusse und 52 Gelenkbusse – Festlegung Laderegime nach Priorität 1 bis 4

Betriebliche Bewertung

Durch den Einsatz von Vollladern, entsprechend der VL2-Priorisierung, erhöht sich der erforderliche Fahrzeugbedarf.

Die Tabelle 6.4 gibt einen Überblick über alle Stufen mit entsprechenden Kennziffern.

Betriebliche Bewertung

	Stufe 1	Stufe 2	Gesamt
Fahrzeuge (kumuliert)			
SB	15	68	68
GB			52
zusätzliche Fahrzeuge (Umlaufteilung)			
SB		4	4
GB			9
Vorgesehene Ladepunkte (kumuliert)	4	11	15
Vorgesehene Ladepunkte (nicht kumuliert)	4	7	4
endpunktspezifisch (nicht kumuliert)	AFR (2) WEH (2)	FAL (2) OSB (2) FRÖ (1) AFR (2)	HOB (1) FRÖ (3)
Trafostationen (kumuliert) 1 Trafo je 2 LP und Ladestandort)	2	6	8
Linien (...) = bereits elektrifizierte Linien und vorhandene Ladepunkte	SB97/952 953/961 955 956	(+) SB94 143 E-Wagen 954 957 (962-OSB) (966-NMK) 976 (979-OSB)	alle
Umläufe (kumuliert)	15	57	112
Umläufe (nicht kumuliert)	15	42	55
GL1 (Priorität 2)	15	7	1
GL2 (Priorität 3)		13	25
VL1 (Priorität 1)		14	12
VL2 (Priorität 4)		8	17

Tabelle 6.4: Kennziffern der Umsetzungsstufen

Betriebliche Bewertung

Stufe 1

In der Stufe 1 werden 15 Umläufe auf Elektrobusbetrieb umgestellt. Diese Umläufe sollen mit Gelegenheitsladern (GL1) betrieben werden. Dazu ist die Errichtung von Ladeinfrastruktur auf der Strecke an den Endpunkten Anne-Frank-Realschule (AFR) und Wehrstraße (WEH) vorgesehen.

Aufgeschlüsselt nach den Referenzszenarien sind in der Tabelle 6.5 die tägliche (Bezugstag Mo-Do) Laufleistung und Einsatzdauer dargestellt.

	Laufleistung	Dauer [h:mm]	Anzahl Umläufe
RSZ / Priorität	Solobus		
A	626 km	36:33	2
GL1	626 km	36:33	2
GL2			
VL1			
VL2			
B	3.600 km	217:05	13
GL1	3.600 km	217:05	13
GL2			
VL1			
VL2			
Gesamt	4.226 km	253:38	15

Tabelle 6.5: Laufleistung, Einsatzzeit, Anzahl Umläufe – Stufe 1

- ▶ Keine zusätzliche Laufleistung / keine erhöhte Einsatzdauer, da in dieser Stufe keine Umläufe als VL2 eingesetzt werden.

Stufe 2

In der Stufe 2 sollen alle bisher eingesetzten Solobusse auf Elektrobusbetrieb umgestellt werden. Die Umläufe sollen als Vollader bzw.

Betriebliche Bewertung

Gelegenheitslader umgestellt werden. Für die Gelegenheitslader ist vorgesehen, dass an den Endpunkten Falkestraße (FAL, 2 LP), Sterkrade Bahnhof (OSB, 2 LP), Fröbelplatz (FRÖ, 1 LP) und Anne-Frank-Realschule (AFR, weitere 2 LP) Ladeinfrastruktur errichtet wird.

Aufgeschlüsselt nach den Referenzszenarien sind in der Tabelle 6.6 die tägliche (Bezugstag Mo-Do) Laufleistung und Einsatzdauer dargestellt.

	Laufleistung	Dauer [h:mm]	Anzahl Umläufe
RSZ / Priorität	SB		
A	3.038 km	169:54	13
GL1	2.361 km	131:11	7
GL2			
VL1	677 km	38:43	6
VL2			
B	9.894 km	621:03	44
GL1	4.108 km	250:47	15
GL2	3.330 km	218:03	13
VL1	406 km	24:09	8
VL2	2.049 km	128:04	8
Gesamt	12.932 km	790:57	57

Tabelle 6.6: Laufleistung, Einsatzzeit, Anzahl Umläufe -Stufe 2

Folgende Mehraufwendungen (Laufleistung, Einsatzdauer; Fahrzeuge) durch den Vollladereinsatz mit Teilung von Umläufen (VL2) sind notwendig:

- ▶ Zusätzliche Laufleistung (aus Umlaufteilung, VL2):
RSZ B, SB: $2.049,338 \text{ km} \cdot 0,04 = \mathbf{81,974 \text{ km}}$
- ▶ Zusätzliche Einsatzdauer (aus Umlaufteilung, VL2):
RSZ B, SB: $128 \text{ h und } 4 \text{ min} \cdot 0,03 = \mathbf{3,842 \text{ h}}$

Betriebliche Bewertung

- Zusätzliche Fahrzeuge (aus Umlaufteilung, VL2):
RSZ B, SB: $8 \cdot 0,48 = 4$ Fahrzeuge

Gesamtumstellung

In der Gesamtumstellung werden alle Fahrzeuge auf Elektrobusbetrieb umgestellt. Entsprechend dem Betriebskonzept werden die Umläufe mit Voll- oder Gelegenheitsladern bedient. Für die Gelegenheitslader sind neben den Ladepunkten der Stufen 1 und 2 folgende Endpunkte mit Ladeinfrastruktur auszurüsten: Holten Bahnhof (HOB, 1 LP) und Fröbelplatz (FRÖ, weitere 3 LP).

Aufgeschlüsselt nach den Referenzszenarien sind in der Tabelle 6.7 die tägliche (Bezugstag Mo-Do) Laufleistung und Einsatzdauer dargestellt.

RSZ / Priorität	Laufleistung [km]		Dauer [h:mm]		Anzahl Umläufe	
	GB	SB	GB	SB	GB	SB
A	11.420,61	3.038,33	618:11	169:54	43	13
GL1		2361,40		131:11		7
GL2	7.631,31		411:19		25	
VL1	321,37	676,94	15:22	38:43	6	6
VL2	3.467,93		191:30		12	
B	1.591,45	9.893,64	103:45	621:03	12	44
GL1	232,33	4.108,03	13:35	250:47	1	15
GL2		3.330,08		218:03		13
VL1	142,17	406,19	7:13	24:09	6	8
VL2	1.216,951	2.049,34	82:57	128:04	5	8
Gesamt	13.012,056	12.931,97	721:56	790:57	55	57

Tabelle 6.7: Laufleistung, Einsatzzeit, Anzahl Umläufe; Gesamtumstellung

Folgende Mehraufwendungen (Laufleistung, Einsatzdauer; Fahrzeuge) durch den Vollladereinsatz mit Teilung von Umläufen (VL2) sind notwendig:

Betriebliche Bewertung

Zusätzliche Laufleistung (aus Umlaufteilung, VL2):

- ▶ RSZ A, GB: $3.467,932 \text{ km} * 0,04 = 138,717 \text{ km}$
- ▶ RSZ B, GB: $1.216,951 \text{ km} * 0,04 = 48,678 \text{ km}$
- ▶ RSZ B, SB: $2.049,340 \text{ km} * 0,04 = 81,974 \text{ km}$

Zusätzliche Einsatzdauer (aus Umlaufteilung, VL2):

- ▶ RSZ A, GB: $191:30 \text{ h} * 0,03 = 5,745 \text{ h}$
- ▶ RSZ B, GB: $82:57 \text{ h} * 0,03 = 2,4885 \text{ h}$
- ▶ RSZ B, SB: $128:04 \text{ h} * 0,03 = 3,842 \text{ h}$

Zusätzliche Fahrzeuge (aus Umlaufteilung, VL2):

- ▶ RSZ A, GB: $12 * 0,48 = 6$
- ▶ RSZ B, GB: $5 * 0,48 = 3$
- ▶ RSZ B, SB: $8 * 0,48 = 4$

6.3 Ladeinfrastruktur Betriebshof

Oberste Priorität hat ein sicherer Betrieb, der für die Ladung aller Batteriebusse sorgt. Eine hohe Effizienz kann durch die Auswahl der Komponenten, aber auch durch eine kurze Anbindung an das MS-Netz erreicht werden. Durch die Ausgestaltung der Primär⁸- und Sekundärversorgung⁹ kann eine entsprechende Versorgungssicherheit ermöglicht werden.

- ▶ Ladepunkt an jedem Abstellplatz
- ▶ Kontaktierung über Pantograph / Ladehaube
- ▶ Ladeleistung: 150 kW für 2 LP (verschaltbar 2 x 75 kW)
- ▶ Kompaktstationen für 16 Ladepunkte mit Trafo, Schaltanlage
- ▶ Mittelspannungsversorgung auf dem Betriebshof als Ring
- ▶ Mobile Ladegeräte in der Werkstatt

Leistungsbedarf

Zur Einschätzung des benötigten Leistungsbedarfs wird eine Untersuchung mit dem BeSystO-ELMA-Tool durchgeführt. Eingangsdaten sind die übergebenen Umlaufdaten (Zeiten des Ein- und Ausrückens, Laufleistung,

⁸ Hinweis | Primärversorgung ist die Anbindung an das Netz des Energieversorgers.

⁹ Hinweis | mit Sekundärversorgung ist die Gestaltung der elektrotechnischen Anlagen auf dem Betriebshof zu verstehen

Betriebliche Bewertung

Fahrzeugtyp), Energieverbräuche nach Referenzszenario und Fahrzeugtyp (siehe 5.1.2).

Es wird angenommen, dass sich der nachzuladende Energiebedarf aus dem Energieverbrauch und der Laufleistung der jeweiligen Umläufe ergibt. Das bedeutet, dass das Zwischenladen auf der Strecke und im Betriebshof (Zwischenlader) unberücksichtigt bleibt. Es wird fiktiv mit unendlich großen Fahrzeugspeichern gerechnet. Dies stellt insofern eine Worst-Case-Betrachtung dar, da entsprechend lange Ladezeiten erreicht werden und sich somit vermehrt Ladevorgänge überschneiden werden, was zu einem höheren Leistungsbedarf führt.

Es werden alle Umläufe der STOAG und von Wohlgemuth für den Betriebstag Mo-Do betrachtet.

Die Zuordnung der Umläufe zwischen Einrücken und Ausrücken erfolgt nach dem First-In-First-Out-Prinzip, sprich das Fahrzeug, welches als erstes in den Betriebshof einrückt wird auch als erstes wieder ausrücken. Somit wird eine möglichst gleiche Verteilung der Ladezeiten unter den Batteriebusen angestrebt. Betrachtet wird zudem eine Rangierzeit von 60 min, die nicht zum Laden genutzt werden kann.

Es werden zwei Ladeleistungsvarianten betrachtet. Eine Variante betrachtet eine feste Ladeleistung von bspw. 75 kW. In der zweiten Variante („gleichmäßige Ladeleistung“) ergibt sich die Ladeleistung aus der verfügbaren Ladezeit und dem Energiebedarf.

Neben der Ladung der Batterien wird ebenso eine 45-minütige Vorkonditionierung der Fahrzeuge berücksichtigt. Es werden Leistungen von 20 kW (Solobus) und 30 kW (Gelenkbus) angesetzt.

Die Ergebnisse sind teilweise ohne Verluste dargestellt. Zur Berechnung des Leistungsbedarfs unter Berücksichtigung der Verluste ist ein Wirkungsgrad zwischen Mittelspannungsanschluss und Batteriebus von 0,9 anzusetzen.

Die grafische Auswertung der Leistungsbedarfsermittlung ist im Anhang 5 zusammengefasst dargestellt.

Bei einer Ladeleistung von 75 kW je Ladegerät/-punkt bzw. gleichmäßiger Ladung ergibt sich der in Tabelle 6.8 aufgeführte Leistungsbedarf.

Betriebliche Bewertung

Stufe	Busse (Solo/Ge- lenk)	Leistung (feste Leistung) [MW]	Leistung (feste Leistung), mit Verlus- ten [MW]	Leistung (gleichmä- ßige Ladung) [MW]	Leistung (gleich- mäßige Ladung), mit Verlus- ten [MW]
1	15	1,05	1,17	1,11	1,23
2	68	2,76	3,07	3,25	3,61
3	68 / 52	5,55	6,17	6,66	7,40

Tabelle 6.8: Maximaler Leistungsbedarf bei 75 kW Ladeleistung / gleichmäßiger Ladung

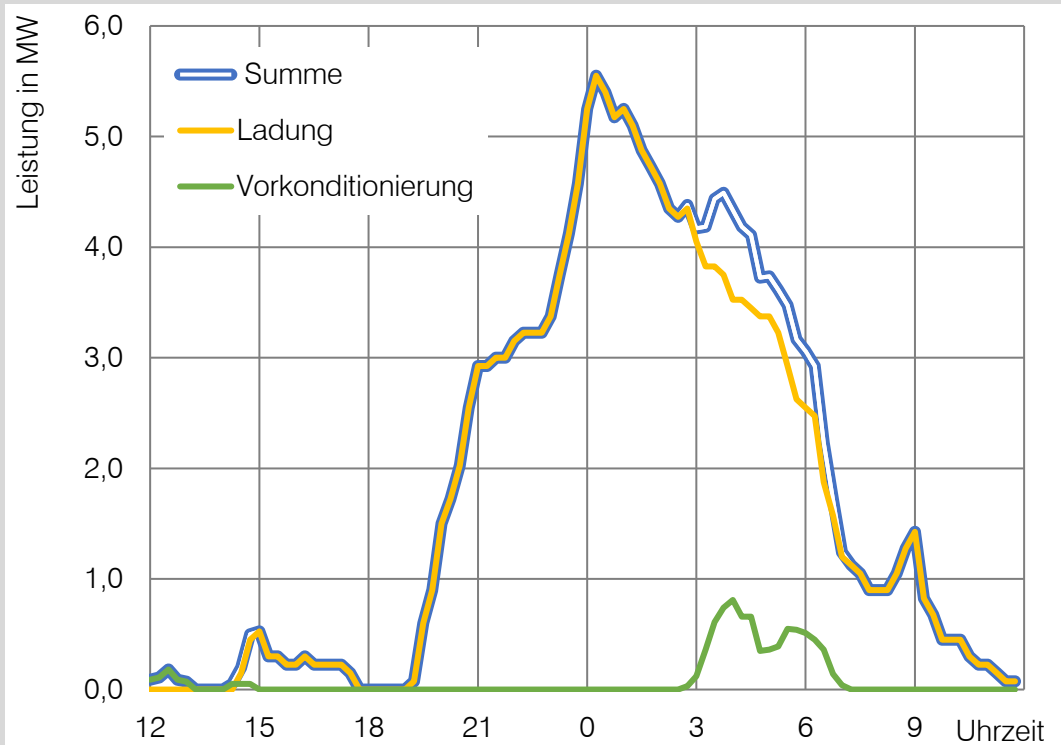


Abbildung 6.1: Leistung, 75 kW, Stufe 3, feste Leistung, ohne Verluste

In Abbildung 6.1 ist der Verlauf des Leistungsbedarfs für die Gesamtumstellung dargestellt. Dabei gibt die gelbe Kurve den Leistungsbedarf zum Laden der Batteriebusse, die grüne Kurve den Leistungsbedarf zum Vorkonditionieren der Busse und die blaue Kurve die Summe beider Kurven an.

Betriebliche Bewertung

Der Leistungsbedarf steigt ab ca. 19 Uhr stark an. Zu dieser Zeit rücken viele Busse ein und viele Ladevorgänge starten. Das Maximum wird gegen 0 Uhr erreicht. Danach sinkt der Leistungsbedarf wieder. Vereinzelt sind auch Ladevorgänge im Tagesverlauf abgebildet; diese rühren von den E-Wagen, die eine begrenzte Einsatzdauer haben.

Um den maximalen Leistungsbedarf zu verringern, bietet sich der Einsatz eines Lade- und Lastmanagementsystems an. So kann erreicht werden, dass die Ladezeitfenster optimal verschoben werden oder Ladeleistungen angepasst werden und dabei ein ausreichend geladener Batteriespeicher für den nächsten Betriebseinsatz garantiert werden kann.

Wird die Ladeleistung auf 100 kW gesteigert ergeben sich folgende Werte für den maximalen Leistungsbedarf.

Stufe	Busse (Solo/ Gelenk)	Leistung (feste Leistung) [MW]	Leistung (feste Leistung), mit Verlusten [MW]	Leistung (gleichmäßige Ladung) [MW]	Leistung (gleichmäßige Ladung), mit Verlusten [MW]
1	15	1,40	1,56	1,11	1,23
2	68	3,00	3,33	3,25	3,61
3	68 / 52	6,30	7,00	6,66	7,40

Tabelle 6.9: Maximaler Leistungsbedarf bei 100 kW Ladeleistung / gleichmäßiger Ladung

Die höhere Ladeleistung führt dazu, dass sich der maximale Leistungsbedarf entsprechend erhöht. Dies gilt jedoch nur, solange keine Optimierung der Ladevorgänge durchgeführt wird (Lade- und Lastmanagement). Um beispielhaft die Auswirkungen der Ladezeitfensterverschiebungen nachvollziehbar zu veranschaulichen, wurde eine solche Optimierung für die Gesamtumstellung und mit einer Ladeleistung von 150 kW durchgeführt. Die entsprechenden Kurven des Leistungsbedarfs sind in Abbildung 6.2 dargestellt.

Betriebliche Bewertung

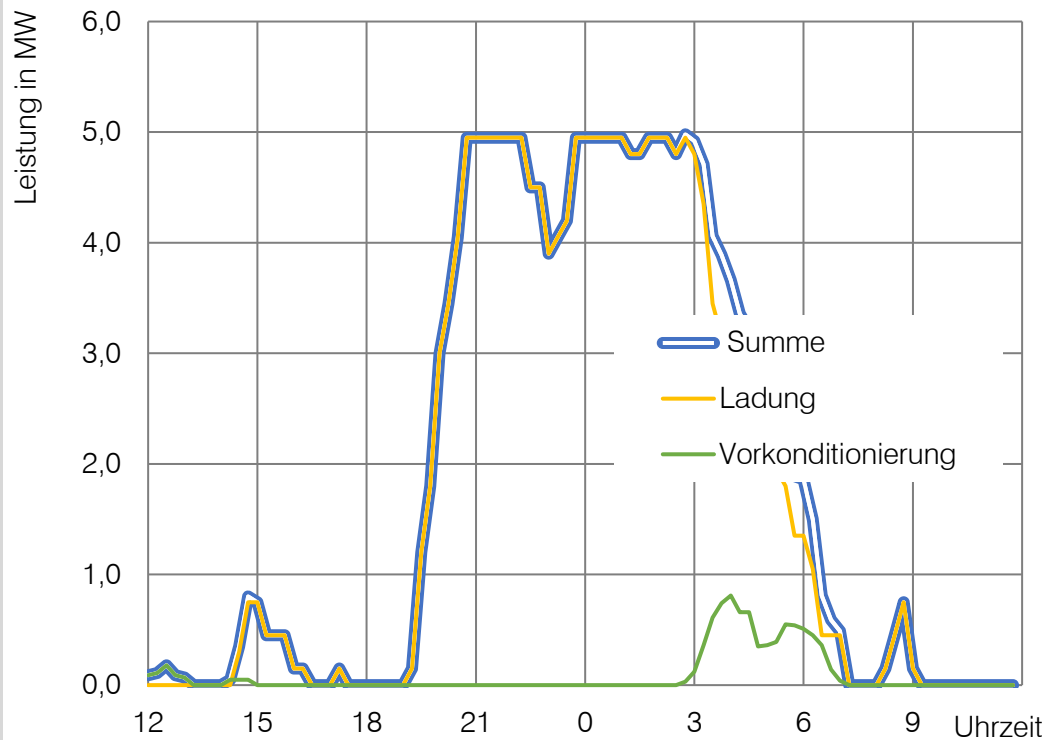


Abbildung 6.2: Leistung, 150 kW, Stufe 3, feste Leistung, ohne Verluste, Optimierung durch Verschieben der Ladezeitfenster

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, entfallen die Leistungsspitzen, sodass sich für längere Zeiträume ein gleicher Leistungsbedarf einstellt. In diesem Fall liegt der maximale Leistungsbedarf bei ca. 5 MW (ohne Verluste). Berücksichtigt man die Wirkungsgradverluste, so ist von einem Leistungsbedarf von 5,55 MW auszugehen. Vergleicht man diesen Wert bei einer Ladeleistung von 75 kW und ohne Optimierung der Ladevorgänge, so lässt sich der maximale Leistungsbedarf um ca. 10 % senken.

Transformatorstationen

- ▶ 1.600 kVA Transformator zur Versorgung von 16 LP je 75 kW oder
- ▶ 2.000 kVA Transformator zur Versorgung von 20 LP je 75 kW

Eine Transformatorstation beinhaltet:

- ▶ Transformator MS/NS
- ▶ MS-Schaltanlage zur Einbindung in MS-Ring

Betriebliche Bewertung

- ▶ NS-Abgänge für Ladegeräte

Ladegeräte

Für eine maximale Flexibilität ist es vorteilhaft, dass an jedem Ladepunkt eine Ladeleistung von bis zu 150 kW verfügbar ist. Ein 150-kW-Ladegerät für jeden Ladepunkt zu beschaffen ist jedoch kostspielig und überdimensioniert. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, dass für jeden Ladepunkt ein Ladegerät mit einer Ladeleistung von 75 kW beschafft wird. Um eine Ladeleistung von 150 kW an einem Ladepunkt zu erreichen, werden je zwei Ladegeräte zusammengeschaltet werden. Wird an einem Ladepunkt mit 150 kW geladen, so ist eine Ladung an dem anderen Ladepunkt nicht möglich. Die Steuerung der Ladepunkte ist über ein Lademanagementsystem zu realisieren.

Für die Nachladung sollte eine Ladeleistung von 75 kW ausreichend bemessen sein. Um ein zügiges Zwischenladen am Tag zu ermöglichen, ist eine Ladeleistung von 150 kW jedoch sinnvoll. So kann der betriebsbedingte Aufenthalt auf dem Betriebshof verkürzt werden und der Batteriebus schnellstmöglich wieder im Liniendienst eingesetzt werden.

Bauliche Gestaltung

Transformatorstation und Ladegeräte können gemeinsam in einem Gebäude (Betonhaus, Container, etc.) untergebracht werden oder getrennt voneinander aufgestellt werden. Wichtiger Einflussfaktor ist die Flächenverfügbarkeit auf dem Betriebshofgelände.

Vorteilhaft ist eine gemeinsame Unterbringung der Komponenten. So können die Ladegeräte beispielsweise von einer gemeinsamen Kühlung profitieren. Die Ladeinfrastruktur ist kompakt in einem bzw. mehreren Gebäuden untergebracht und nicht auf dem Betriebshof bzw. der Abstellhalle verteilt. Ein solches Gebäude kann durch entsprechende Firmen bereits im Werk mit den Komponenten wie Transformator, Schaltanlagen und Ladegeräten ausgebaut werden. Auf dem Betriebshof erfolgt der Anschluss an die Spannungsversorgung und das Backendsystem sowie die Anbindung an die Ladepunkte.

Bei der getrennten Aufstellung ist es möglich, die Ladegeräte ggfs. näher zu den Ladepunkten zu positionieren. Jedoch ist der Aufwand bei der Errichtung der Ladegeräte entsprechend höher.

Betriebliche Bewertung

Ausbau der Ladeinfrastruktur

Mit Transformatoren mit 1.600 kVA Leistung ist folgender Ausbau der LIS denkbar.

Stufe	Transformatoren	Ladepunkte	Installierte Gesamtleistung
1	1	16	1.600 kVA
2	4	64	6.400 kVA
Gesamt	8	128	12.800 kVA

Tabelle 6.10: Ausbau der Ladeinfrastruktur Betriebshof

Die installierte Gesamtleistung liegt deutlich höher als der zuvor errechnete Leistungsbedarf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nicht alle Ladegeräte zeitgleich betrieben werden. Es ist ein Gleichzeitigkeitsfaktor zu berücksichtigen. Die installierte Leistung dient zur Auslegung der erforderlichen Schutztechnik, der berechnete Leistungsbedarf zur Dimensionierung der Kabel.

Die MS-Versorgung (Übergabestation und MS-Kabel) ist für die Gesamtumstellung zu dimensionieren.

6.4 Ladeinfrastruktur Strecke

Für den Einsatz von Gelegenheitsladern ist Ladeinfrastruktur an der Strecke notwendig. Die Nachladung der Batteriebusse soll an den Endpunkten erfolgen. Neben den bereits existierenden Endpunkten sind folgende Standorte für die Errichtung von Ladeinfrastruktur vorgesehen:

- ▶ Anne-Frank-Realschule
 - ▶▶ 2 LP in Stufe 1
 - ▶▶ 2 weitere LP in Stufe 2
- ▶ Wehrstraße
 - ▶▶ 2 LP in Stufe 1
- ▶ Falkestraße
 - ▶▶ 2 LP in Stufe 2
- ▶ Fröbelplatz
 - ▶▶ 1 LP in Stufe 2
 - ▶▶ 3 weitere LP in der letzten Stufe

Betriebliche Bewertung

- ▶ Sterkrade Bahnhof
 - ▶▶ 2 weitere LP in Stufe 2
- ▶ Holten Bahnhof
 - ▶▶ 1 LP in der letzten Stufe

Alle Ladepunkte und die zugehörige Ladetechnik sollten so beschaffen sein, dass Wartung und Instandhaltung einfach durchzuführen sind und entsprechende, baugleiche Komponenten in allen Standorten zum Einsatz kommen.

So soll an jedem Ladepunkt eine Ladeleistung von mindestens 300 kW anliegen. Jeweils zwei Ladepunkte und die zugehörigen Ladegeräte werden von einem Transformator in der Leistungsklasse 630 kVA gespeist. Die genaue Ausführung des Transformators und der Ladegeräte ist in späteren Planungsschritten zu definieren. Zudem sollte auf Redundanz geachtet werden, damit ein Ausfall eines Ladepunktes vermieden wird. Mindestens sollte im Fall einer Störung der Ladeinfrastruktur ein eingeschränkter Betrieb mit verminderter Ladeleistung bis zur Behebung des Problems möglich sein.

Die Kontaktierung soll über das Docking-System mit einem Hub-Pantographen auf dem Fahrzeug und einer wegseitigen Ladehaube erfolgen. Dieses System findet bereits jetzt bei den aktuellen Elektrobuslinien in Oberhausen Anwendung. Eine Kompatibilität ist somit gegeben.

6.5 ***Festlegungen der STOAG nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie***

Im Zuge der Erarbeitung der Machbarkeitsstudie wurde der Endpunkt Anne-Frank-Realschule als geeigneter Ladestandort ermittelt und zur Nachladung der Linien SB97/952 und 955 herangezogen. Durch die STOAG wurde nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie beschlossen, dass der Endpunkt Anne-Frank-Realschule vorerst nicht als Ladepunkt realisiert werden kann. Daraus ergeben sich folgende Änderungen, die in den Ausführungen dieser Machbarkeitsstudie nicht berücksichtigt wurden:

- ▶ *Die Umstellung der Linie 955 auf Elektrobusbetrieb erfolgt nicht in Umsetzungsstufe 1, sondern zu einem späteren Zeitpunkt (voraussichtlich in Umsetzungsstufe 2).*
- ▶ *Alternativ zum Endpunkt Anne-Frank-Realschule sollen die Endpunkte Everslohstraße (Linie SB97/952, Stufe 1) und Heinrich-Böll-Gesamtschule (Linie 955, Stufe 2) als Ladepunkte ausgebaut werden.*

7 Ökonomische Betrachtung

7.1 Grundlagen

Die ökonomische Untersuchung des Elektrobuseinsatzes erfolgt für verschiedene **Betrachtungsfälle**, die sich an den geplanten Umstellungsstufen der Elektrobuseinführung orientieren. In der 1. Umstellungsstufe ist der Einsatz von 15 Solo-Elektrobussen auf den Linien SB97/952, 953/961, 955 und 961 bis 2021 vorgesehen. Die 2. Stufe berücksichtigt die Umstellung aller 68 Solobusse bis zum Jahr 2029. Die letzte Stufe umfasst die Umstellung der gesamten Fahrzeugflotte auf Elektrobusbetrieb. Zur Einschätzung und Referenzierung der ermittelten Kosten werden zudem die Kosten spezifisch für einen Solo- und einen Gelenkbus ausgewiesen.

Der Kostenbetrachtung liegt das im Zuge der technisch-betrieblichen Untersuchung entwickelte **Betriebskonzept**, im Konkreten die E-Bus-Systemkonfiguration, zur Umsetzung des Elektrobusbetriebs bei der STOAG zugrunde. Da nicht alle Umläufe der STOAG als Volllader abbildbar sind, wird im Betriebskonzept sowohl der Einsatz von Vollladern als auch Gelegenheitsladern vorgesehen. Folglich ist die Errichtung von Ladeinfrastruktur sowohl für den Volllader- als auch den Gelegenheitsladereinsatz geplant. Um ein einheitliches Fahrzeugsystem sicherstellen zu können, differiert die Auslegung der Fahrzeuge lediglich zwischen Solo- und Gelenkfahrzeugen.

In den Berechnungen werden die Jahresleistungen (STOAG + Wohlgermuth), differenziert nach den Einsatztagen Montag - Freitag, Samstag sowie Sonn- und Feiertag, gemäß Tabelle 7.1, angesetzt. Die Jahresleistung für Samstag, Sonn- und Feiertag wird auf Basis des Verhältnisses der in Anhang 4 aufgeführten Jahresleistungen ermittelt.

Ökonomische Betrachtung

	Tage	Einsatzdauer	Laufleistung
Ø Tagesfahrleistung		1.348 h/Tag	23.116 km/Tag
Jahresbetriebsdauer bzw. -laufleistung (Werktag ohne Samstag)	253 Tage	380.280 h/Jahr	6.521.084 km/Jahr
Jahresbetriebsdauer bzw. -laufleistung (Samstag)	52 Tage	57.015 h/Jahr	977.262 km/Jahr
Jahresbetriebsdauer bzw. -laufleistung (Sonntag/Feiertage)	60 Tage	54.723 h/Jahr	939.141 km/Jahr
Jahresbetriebsdauer bzw. laufleistung (Referenzbus)	365 Tage	492.017 h/Jahr	8.437.487 km/Jahr
Jahresbetriebsdauer bzw. Laufleistungserhöhung für E-Bus gegenüber Referenzbus p.a.		4.231 h/Jahr	95.513 km/Jahr
Jahresbetriebsdauer bzw. Jahreslaufleistung der Linie (Elektrobus)		496.248 h/Jahr	8.533.000 km/Jahr

Tabelle 7.1: Jahresbetriebsdauer und Jahreslaufleistung (STOAG+SUB Wohlgemuth)

Die Umstellungsstufen sind für die Berechnung in vier TCO-Dateien unterteilt (TCO - Total Cost of Ownership). In der Tabelle 7.2 sind für jede Stufe und jede TCO-Datei die Anzahl der Fahrzeuge und der jeweilige Mehrbedarf (+) gemäß dem Betriebskonzept dargestellt. Der Mehrbedarf ergibt sich für die Umläufe, die der Priorität 4 (VL2 – Teilung der Umläufe) zugeordnet sind. So können unterschiedliche Energieverbräuche differenziert nach Referenzszenario und Fahrzeugtyp in jeweils einer getrennten Flotte für jede Ausbaustufe zum Ansatz gebracht werden.

Ökonomische Betrachtung

	Einstufung	1. Stufe	2. Stufe (kumuliert)	Gesamt
TCO 1	RSZ A, GB			42+6
TCO 2	RSZ A, SB	2	16	16
TCO 3	RSZ B, GB			10+3
TCO 4	RSZ B, SB	13	52+4	52+4

Tabelle 7.2: Anzahl der Busse gegliedert nach TCO-Dateien und Umstufungsstufen

Im Rahmen der Kostenbetrachtung werden neben den **Investitionskosten** die **Gesamtkosten** des Elektrobusbeinsatzes über die vorgesehene **Einsatzzeit** des Elektrobusseinsatzes von 12 Jahren bei der STOAG als durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten ausgewiesen. Dem Elektrobusseinsatz wird der herkömmliche Dieselseinsatz gegenübergestellt und die spezifischen **Mehr- bzw. Minderkosten** aufgeführt.

In der Kostenbetrachtung wird zudem die angestrebte **Förderung** der Elektrobusbeschaffung beim Land und Bund berücksichtigt. Die Kosten werden entsprechend als Kosten mit und ohne Förderung aufgezeigt.

Folgende Förderprogramme werden herangezogen:

- ▶ „ElektroMobilität NRW – Förderung von Elektrobussen“ (Land)

Die Förderung beträgt 60 % der Investitionsmehrausgaben beim Kauf von batterieelektrischen und wasserstoffbetriebenen Linienbussen des ÖPNV gegenüber konventionellen Dieselfahrzeugen sowie 90 % der zuwendungsfähigen Kosten für die Errichtung der notwendigen Infrastruktur und zur Beschaffung der erforderlichen speziellen Werkstatteinrichtungen.

- ▶ „Richtlinie zur Förderung der Anschaffung von Elektrobussen im öffentlichen Personennahverkehr“ des Bundes

Über dieses Programm werden die Investitionsmehrkosten für die Beschaffung von batterieelektrischen Bussen in Höhe von 80 % und die Errichtung der für den Betrieb notwendigen Ladeinfrastruktur und Werkstattausrüstung in Höhe von 40 % gefördert.

Ökonomische Betrachtung

Auf Basis der aufgeführten Förderprogramme werden der Kostenbetrachtung zwei **Förderszenarien** zugrunde gelegt. Zum einen wird die Landesförderung über den Land herangezogen (60 % Fahrzeugmehrkosten, 90 % Ladeinfrastruktur, Werkstattausrüstung). Zum anderen wird die Kombination der Landes- und Bundes-Förderung abgebildet. Hierbei wird eine Förderung des Landes in Höhe von 60 % und des Bundes in Höhe von 20 % auf die Investitionsmehrkosten für den Elektrobus herangezogen sowie eine Förderung durch das Land in Höhe von 90 % auf die Beschaffung der Ladeinfrastruktur und Werkstattausrüstung berücksichtigt.

Neben den drei Umstellungsstufen (1. Stufe, 2. Stufe und Gesamtumstellung der Flotte auf ausschließlichen Elektrobusbetrieb) wurden für den Fall der Gesamtumstellung die entsprechenden anteiligen Kosten auf einen einzelnen Solo- und Gelenk-Elektrobus umgelegt.

Einen Überblick über die ermittelten Kosten bieten die beiden nachfolgenden Abbildungen 8.1 und 8.2.

Ökonomische Betrachtung

	1. Stufe 15 SB	2. Stufe 68+4 SB	Gesamt 68+4 SB, 52+9 GB
INVESTITIONSKOSTENBETRACHTUNG			
Investitionskosten Elektrobussystem			
▪ ohne Förderung	18.305.532 €	69.984.702 €	137.131.085 €
▪ mit Förderung Land 60 % IK-Mehrkosten Fahrzeug 90 % LIS, Werkstattausrüstung	7.536.179 €	33.002.460 €	69.131.930 €
▪ mit Förderung Land + Bund 80 % IK-Mehrkosten Fahrzeug 90 % LIS, Werkstattausrüstung	5.791.874 €	24.629.796 €	51.975.632 €
GESAMTKOSTENBETRACHTUNG			
Betriebs- & Investitionskosten Elektrobus			
▪ ohne Förderung	4,03 €/km	4,58 €/km	4,40 €/km
▪ mit Förderung Land 60 % IK-Mehrkosten Fahrzeug 90 % LIS, Werkstattausrüstung	3,36 €/km	3,62 €/km	3,53 €/km
▪ mit Förderung Land + Bund 80 % IK-Mehrkosten Fahrzeug 90 % LIS, Werkstattausrüstung	3,24 €/km	3,43 €/km	3,34 €/km
Betriebs- & Investitionskosten Dieselbus			
▪ ohne Förderung	3,21 €/km	3,29 €/km	3,26 €/km
Mehr-/ Minderkosten Elektrobus gegenüber Dieselbus			
▪ ohne Förderung	0,82 €/km	1,29 €/km	1,14 €/km
▪ mit Förderung Land 60 % IK-Mehrkosten Fahrzeug 90 % LIS, Werkstattausrüstung	0,15 €/km	0,33 €/km	0,27 €/km
▪ mit Förderung Land + Bund 80 % IK-Mehrkosten Fahrzeug 90 % LIS, Werkstattausrüstung	0,03 €/km	0,14 €/km	0,08 €/km

Abbildung 7.1: Gesamtüberblick über ermittelte Kosten für Umstellungsstufen

Ökonomische Betrachtung

	Einzelfahrzeug 1 Solo-Bus	Einzelfahrzeug 1 Gelenk-Bus
INVESTITIONSKOSTENBETRACHTUNG		
Investitionskosten Elektrobussystem		
▪ ohne Förderung	923.033 €	1.158.568 €
▪ mit Förderung Land 60 % IK-Mehrkosten Fahrzeug 90 % LIS, Werkstattausrüstung	449.885 €	602.299 €
▪ mit Förderung Land + Bund 80 % IK-Mehrkosten Fahrzeug 90 % LIS, Werkstattausrüstung	333.598 €	458.305 €
GESAMTKOSTENBETRACHTUNG		
Betriebs- & Investitionskosten Elektrobus		
▪ ohne Förderung	4,60 €/km	4,20 €/km
▪ mit Förderung Land 60 % IK-Mehrkosten Fahrzeug 90 % LIS, Werkstattausrüstung	3,71 €/km	3,36 €/km
▪ mit Förderung Land + Bund 80 % IK-Mehrkosten Fahrzeug 90 % LIS, Werkstattausrüstung	3,52 €/km	3,17 €/km
Betriebs- & Investitionskosten Dieselbus		
▪ ohne Förderung	3,58 €/km	2,95 €/km
Mehr-/ Minderkosten Elektrobus gegenüber Dieselbus		
▪ ohne Förderung	1,02 €/km	1,25 €/km
▪ mit Förderung Land 60 % IK-Mehrkosten Fahrzeug 90 % LIS, Werkstattausrüstung	0,13 €/km	0,41 €/km
▪ mit Förderung Land + Bund 80 % IK-Mehrkosten Fahrzeug 90 % LIS, Werkstattausrüstung	-0,06 €/km	0,22 €/km

Abbildung 7.2: Gesamtüberblick über ermittelte Kosten für Einzelfahrzeugbetrachtung

7.2 Investitionskostenbetrachtung

Die Investitionskostenermittlung berücksichtigt alle Kostenpositionen, die zur Umstellung des konventionellen Dieselbusbetriebs auf Elektrobusbetrieb bei der STOAG erforderlich sind.

Die Ausweisung der Investitionskosten erfolgt nach der folgenden Kostenstruktur:

- ▶ a) Fahrzeugkosten
 - ▶▶ Grundfahrzeug
 - ▶▶ Fahrzeugausrüstung (Traktionskomponenten)
 - ▶▶ Energiespeicher
- ▶ b) Kosten für Ladeinfrastruktur
 - ▶▶ Depotladestationen
 - ▶▶ Schnellladestationen
 - ▶▶ Errichtungskosten
- ▶ c) Sonstige Kosten
 - ▶▶ Werkstattausrüstung
 - ▶▶ Personalschulungen
 - ▶▶ Sonstige Projektkosten

a) Fahrzeugkosten

In den Fahrzeugkosten enthalten sind die Kosten für das Grundfahrzeug abzüglich einer Minderung für die nicht benötigten Antriebskomponenten im Vergleich zum Dieselbus. Für den Energiespeicher in Ausführung als Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt (NMC)-Akkumulator wird entsprechend der konfigurierten Speichergröße ein entsprechender Kostenanteil berücksichtigt. Darüber hinaus fließt anteilig ein Risikoaufschlag für Garantieleistungen des Herstellers für die Batteriekapazität neben den von der STOAG gewünschten Sonderausstattungen gegenüber dem Grundfahrzeug wie eine dritte Fahrzeugschürze beim Solobus mit in die Fahrzeugkosten ein.

b) Kosten für Ladeinfrastruktur

In den Kosten für die Ladeinfrastruktur werden die Kosten für die Ladeinfrastruktur an den Endpunkten auf der Strecke sowie im Betriebshof zum Nachladen erfasst. Dies umfasst neben den eigentlichen Ladegeräten sowie den Ladehauben auch die notwendigen Komponenten der

Ökonomische Betrachtung

Elektroenergieversorgung sowie den Anschluss an das Mittelspannungsnetz. Zudem wurden die Leitungswegekosten, die aus den Kosten für den Ausbaubedarf auf dem Betriebshof und pauschalierten Beträgen für den Bau der Ladestationen gebildet werden, berücksichtigt.

c) Sonstige Kosten

Zusätzlich werden die Personalaufwendungen für die Erstqualifizierung von Mitarbeitern in Fahrdienst und Werkstatt für die Arbeit an und mit Elektrobusen sowie Personalkosten für das Projektmanagement als Einmalkosten in die Betrachtung einbezogen.

Die Grundlage für die Ermittlung der Investitionskosten bilden verifizierte Kosten, welche fortlaufend mit den am Markt verfügbaren Technologien und den dazugehörigen Kosten abgeglichen werden. Sofern zum Betrachtungszeitpunkt keine Kostenangaben vorlagen, wurden Kosten-schätzungen auf Grundlage von Marktanalysen durchgeführt.

Entsprechend der definierten Umstufungsstufen erfolgt im Folgenden die Auswertung der Investitionskosten.

- ▶ Investitionskosten für Stufe 1 (Kapitel 8.2.1)
- ▶ Investitionskosten für Stufe 2 (Kapitel 8.2.2)
- ▶ Investitionskosten für Gesamtumstellung (Kapitel 7.2.3)
- ▶ Investitionskosten für 1 Solo-Elektrobus und 1 Gelenk-Elektrobus (Kapitel 7.2.4)

Die Ergebnisse der Investitionskostenbetrachtung, differenziert nach verschiedenen Betrachtungsszenarien, sind im Anhang 9 aufgeführt.

7.2.1 Investitionskosten für Stufe 1

In der ersten Umstufungsstufe ist die Umstellung der Linien SB97/952, 953/961, 955 und 961 auf Elektrobusbetrieb vorgesehen. Der Linienbetrieb erfordert den Einsatz von 15 Solo-Elektrobussen, in der Ausführung als Gelegenheitslader, d. h. mit Nachladung auf der Strecke und Nachladung im Betriebshof. Es werden Kosten für die Errichtung von zwei Ladestationen mit jeweils zwei Ladepunkten auf der Strecke, voraussichtlich an den Standorten Anne-Frank-Realschule und Wehrstraße angesetzt.

Für die Ladung im Betriebshof werden acht Ladestationen mit jeweils zwei miteinander verschaltbaren Ladepunkten im Betriebshof mit einer Leistung von 75 kW berücksichtigt.

Ökonomische Betrachtung

Der Gesamtinvestitionsbedarf für die geplante Einführung der 15 Solo-Elektrobusse beträgt 18.305.532 Euro. Bei einer Förderung durch das Land reduziert sich der Gesamtinvestitionsbedarf auf ca. 7,5 Mio. Euro. Bei einer Bundes-/Landes-Förderung beträgt der gesamte Investitionsaufwand ca. 5,8 Mio. Euro.

Einen Kostenüberblick bietet die Kostenzusammenstellung in Abbildung 7.3.

Investitionskosten		ohne Förderung	mit Förderung	
			Land	Bund und Land
1. Elektrobus	15 Stück	11.601.525 €	6.368.610 €	4.624.305 €
2. Ladeinfrastruktur		5.249.499 €	524.950 €	524.950 €
3. Sonstige Kosten		1.454.508 €	642.619 €	642.619 €
Gesamtkosten:		18.305.532 €	7.536.179 €	5.791.874 €

Abbildung 7.3: Investitionskosten für Stufe 1 – 15 Solo-Elektrobusse

Die Fahrzeugkosten betragen anteilig ca. 11,6 Mio. Euro. Bei einer Förderung durch das Land reduziert sich der Investitionsbedarf auf ca. 6,4 Mio. Euro. Bei einer Bundes-/Landes-Förderung beträgt der Investitionsaufwand ca. 4,6 Mio. Euro.

Für die Errichtung der Ladeinfrastruktur sind ca. 5,2 Mio. Euro anzusetzen. Bei einer Förderung durch das Land als auch der Bundes-/Landes-Förderung reduziert sich der Investitionsbedarf für die Ladeinfrastruktur auf ca. 0,5 Mio. Euro.

Die Kosten für Werkstattausrüstung, Schulungen und Projektkosten betragen ca. 1,5 Mio. Euro. Bei einer Förderung durch das Land als auch der Bundes-/Landes-Förderung reduziert sich der Investitionsbedarf auf ca. 0,6 Mio. Euro.

7.2.2 Investitionskosten für Stufe 2

In der zweiten Umstufungsstufe ist die Umstellung von 68 Solobus-Umläufen entsprechend der Prioritätsreihenfolge des Betriebskonzepts sowohl zum Teil als Gelegenheitslader (GL1 und GL2) sowie auch als Voll-lader (VL1 und VL2) vorgesehen. Durch die Aufteilung der nur als Voll-lader zu realisierenden Voll-lader-Umläufe (VL2) kommt es zu einer Teilung der Umläufe, die in einem Fahrzeugmehraufwand von 4 Solo-Elektrobussen resultiert.

Ökonomische Betrachtung

Für die Gelegenheitslader werden zusätzlich fünf weitere Ladepunkte an drei neuen Standorten (2 x Falkestraße, 1 x Fröbelplatz, 2 x Bahnhof Sterkrade) sowie zwei weitere Ladepunkte am bereits genutzten Standort Anne-Frank-Realschule errichtet.

Für die Nachladung im Betriebshof werden vier Gruppen à 16 Ladepunkte, die von jeweils einem Trafo einer Kompaktstation versorgt werden, vorgesehen. Dabei sind jeweils zwei Ladepunkte miteinander verschaltbar. Die Möglichkeit der Verschaltbarkeit der Ladegeräte untereinander ermöglicht eine entsprechende Flexibilität, um die installierte Anschlussleistung optimal zu nutzen (Lastgangoptimierung).

Der Gesamtinvestitionsbedarf für die geplante Einführung der 72 Solo-Elektrobusse beträgt 69.984.702 Euro. Bei einer Förderung durch das Land reduziert sich der Investitionsbedarf auf ca. 33 Mio. Euro. Bei einer Bundes-/Landes-Förderung beträgt der Investitionsaufwand ca. 24,6 Mio. Euro.

Investitionskosten		ohne Förderung	mit Förderung	
			Land	Bund und Land
1. Elektrobus	72 Stück	55.687.320 €	30.569.328 €	22.196.664 €
2. Ladeinfrastruktur		11.577.312 €	1.157.731 €	1.157.731 €
3. Sonstige Kosten		2.720.071 €	1.275.400 €	1.275.400 €
Gesamtkosten:		69.984.702 €	33.002.460 €	24.629.796 €

Abbildung 7.4: Investitionskosten für Stufe 2 – 68+4 Solo-Elektrobusse

Die Fahrzeugkosten betragen anteilig ca. 55,7 Mio. Euro. Bei einer Förderung durch das Land reduziert sich der Investitionsbedarf auf ca. 30,6 Mio. Euro. Bei einer Bundes-/Landes-Förderung beträgt der Investitionsaufwand ca. 22,2 Mio. Euro.

Für die Errichtung der Ladeinfrastruktur sind ca. 11,6 Mio. Euro anzusetzen. Bei einer Förderung durch das Land als auch der Bundes-/Landes-Förderung reduziert sich der Investitionsbedarf auf ca. 1,2 Mio. Euro.

Die Kosten für Werkstattausrüstung, Schulungen und Projektkosten betragen ca. 2,7 Mio. Euro. Bei einer Förderung durch das Land als auch der Bundes-/Landes-Förderung reduziert sich der Investitionsbedarf auf ca. 1,3 Mio. Euro.

Ökonomische Betrachtung

7.2.3 Investitionskosten für Gesamtumstellung

In der Gesamtumstellung ist die Umstellung von 68 Solobus- sowie 52 Gelenkbus-Umläufen entsprechend der Prioritätsreihenfolge des Betriebskonzepts sowohl zum Teil als Gelegenheitslader (GL1 und GL2) sowie auch als Volllader (VL 1 und VL2) vorgesehen. Durch die Realisierung der nur als Volllader realisierbaren Umläufe (VL2) kommt es zu einer Teilung der Umläufe, die in einem Fahrzeugmehraufwand von 4 Solo-Elektrobussen sowie 9 Gelenk-Elektrobussen resultiert.

Für die Gelegenheitslader werden zusätzlich drei weitere Ladepunkte am bereits genutzten Standort Fröbelstraße sowie ein weiterer Ladepunkt am Standort Holten Bahnhof vorgesehen, so dass für die Gesamtumstellung in Summe 15 Ladepunkte an sechs verschiedenen Standorten vorgesehen werden.

Für die Nachladung im Betriebshof werden acht Gruppen à 16 Ladepunkte, die von jeweils einem Trafo einer Kompaktstation versorgt werden, vorgesehen. Dabei sind jeweils zwei Ladepunkte miteinander verschaltbar. Die Möglichkeit der Verschaltbarkeit der Ladegeräte untereinander ermöglicht eine entsprechende Flexibilität, um die installierte Anschlussleistung optimal zu nutzen (Lastgangoptimierung).

Der Gesamtinvestitionsbedarf für die geplante Einführung der 72 Solo-Elektrobussen sowie 61 Gelenk-Elektrobussen beträgt 137.131.085 Euro. Bei einer Förderung durch das Land reduziert sich der Investitionsbedarf auf ca. 69,1 Mio. Euro. Bei einer Bundes-/Landes-Förderung beträgt der Investitionsaufwand ca. 52 Mio. Euro.

Investitionskosten		ohne Förderung	mit Förderung	
			Land	Bund und Land
1. Elektrobus	133 Stück	117.234.490 €	65.765.596 €	48.609.298 €
2. Ladeinfrastruktur		16.243.322 €	1.624.332 €	1.624.332 €
3. Sonstige Kosten		3.653.273 €	1.742.001 €	1.742.001 €
Gesamtkosten:		137.131.085 €	69.131.930 €	51.975.632 €

Abbildung 7.5: Investitionskosten für Gesamtumstellung - 68+4 Solo-Elektrobussen und 52+9 Gelenk-Elektrobussen

Die Fahrzeugkosten betragen anteilig ca. 117,2 Mio. Euro. Bei einer Förderung durch das Land reduziert sich der Investitionsbedarf auf ca.

Ökonomische Betrachtung

65,8 Mio. Euro. Bei einer Bundes-/Landes-Förderung beträgt der Investitionsaufwand ca. 48,6 Mio. Euro.

Für die Errichtung der Ladeinfrastruktur sind ca. 16,2 Mio. Euro anzusetzen. Bei einer Förderung durch das Land als auch der Bundes-/Landes-Förderung reduziert sich der Investitionsbedarf auf ca. 1,6 Mio. Euro.

Die Kosten für Werkstattausrüstung, Schulungen und Projektkosten betragen ca. 3,7 Mio. Euro. Bei einer Förderung durch das Land als auch der Bundes-/Landes-Förderung reduziert sich der Investitionsbedarf auf ca. 1,7 Mio. Euro.

7.2.4 Investitionskosten für 1 Solo-Elektrobus und 1 Gelenk-Elektrobus

Resultierend aus den ermittelten Investitionskosten für die Gesamtumstellung wurde hier der Investitionsbedarf auf einen einzelnen Solo- und einen Gelenk-Elektrobus umgelegt.

In Abbildung 7.6 für den Solo-Elektrobus sowie in Abbildung 7.7 für den Gelenk-Elektrobus ist der kalkulierte Investitionsaufwand, aufgeschlüsselt nach Fahrzeug-, Ladeinfrastruktur- und sonstigen Kosten aufgeführt.

Grundsätzlich basiert die Kostenbetrachtung der Einzelfahrzeuge auf den der Flottenbetrachtung zugrunde liegenden Eingangsdaten für die Gesamtumstellung.

Die Investitionskosten für die Einzelfahrzeugbetrachtung wurden generalisiert ermittelt. Hier wurden die Kosten der Gesamtflottenbetrachtung entsprechend den Laufleistungen auf einen Standard- und einen Gelenkbus umgelegt.

Investitionskosten		ohne Förderung	mit Förderung	
			Land	Bund und Land
1. Elektrobus	1 SB	773.435 €	424.574 €	308.287 €
2. Ladeinfrastruktur		122.130 €	12.213 €	12.213 €
3. Sonstige Kosten		27.468 €	13.098 €	13.098 €
Gesamtkosten:		923.033 €	449.885 €	333.598 €

Abbildung 7.6: Investitionskosten für 1 Solo-Elektrobus (Umlage der Kosten aus Daten der Gesamtumstellung)

Ökonomische Betrachtung

Investitionskosten		ohne Förderung	mit Förderung	
			Land	Bund und Land
1. Elektrobus	1 GB	1.008.970 €	576.988 €	432.994 €
2. Ladeinfrastruktur		122.130 €	12.213 €	12.213 €
3. Sonstige Kosten		27.468 €	13.098 €	13.098 €
Gesamtkosten:		1.158.568 €	602.299 €	458.305 €

Abbildung 7.7: Investitionskosten für 1 Gelenk-Elektrobus (Umlage der Kosten aus Daten der Gesamtumstellung)

Die Gesamtinvestitionskosten für die Einführung von einem Solo- und einem Gelenk-Elektrobus unterscheiden sich lediglich in den reinen Fahrzeugkosten, die beim Solobus ca. 773 TEuro und beim Gelenkbus ca. 1.009 TEuro betragen. Die Gesamtinvestitionskosten betragen beim Solobus ca. 923 TEuro und beim Gelenkbus ca. 1.159 TEuro.

Der durch die STOAG zu erbringende Investitionsbedarf kann über die angestrebte Landes-Förderung um ca. 51 % auf ca. 450 TEuro beim Solo-Bus und um ca. 48 % auf ca. 602 TEuro reduziert werden. Bei einer Kombiförderung durch das Land und den Bund beträgt der investive Eigenanteil ca. 334 TEuro für den Solo-Bus, was einer Kostenreduktion um 64 % entspricht. Für einen Gelenk-Bus reduziert sich durch die Kombiförderung der investive Eigenanteil auf ca. 458 TEuro, was einer Kostenreduktion um 60 % entspricht.

Die Ladeinfrastrukturkosten sind fahrzeuggrößenunabhängig. Die anteiligen Kosten der Ladeinfrastruktur betragen ca. 122 TEuro und die Sonstigen Kosten – das sind die Kosten für die Werkstattaufrüstung, Schulungen und Projektkosten – in Höhe von ca. 27 TEuro sind in der Kostenbetrachtung fahrzeuggrößenunabhängig. Deshalb werden sie beim Solo- und Gelenkbus gleich angesetzt.

7.3 Gesamtkostenbetrachtung

Um eine Aussage hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Elektrobuseinsatzes treffen zu können, wurde eine umfassende Gesamtkostenbetrachtung, unter Einbeziehung aller Betriebs- und Investitionskosten, durchgeführt.

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, differenziert nach verschiedenen Betrachtungsszenarien, sind im Anhang 10 aufgeführt.

Ökonomische Betrachtung

7.3.1 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgte auf Basis der Kapitalwertmethode, wobei sämtliche Investitionskosten und die erforderliche Erneuerung der Traktionsenergiespeicher in bestimmten Intervallen unter Berücksichtigung der Kosten für die Kapitalverzinsung einfließen.

Folgende Kostenpositionen fließen in die Investitions- und Betriebskostenermittlung ein.

Investitions- und Betriebskosten Elektrobus

- ▶ a) Fahrzeug
 - ▶▶ Investition Grundfahrzeug
 - ▶▶ Investition Traktionsausrüstung
 - ▶▶ Verkaufserlös Fahrzeug
 - ▶▶ Erst- und Ersatzinvestition Energiespeicher
 - ▶▶ Restwert Energiespeicher
 - ▶▶ Instandhaltung Fahrzeug
 - ▶▶ Retrofit Fahrzeug
 - ▶▶ Reservefahrzeug
- ▶ b) Infrastruktur
 - ▶▶ Investition Infrastruktur
 - ▶▶ Investition Werkstatt
 - ▶▶ Instandhaltung Infrastruktur
- ▶ c) Betriebskosten
 - ▶▶ Fahrpersonal
 - ▶▶ Stromkosten Betriebseinsatz
 - ▶▶ Heizkosten
 - ▶▶ Sonstige Kosten
 - ▶▶ Schulung
 - ▶▶ Werkstattausrüstung
 - ▶▶ Projektkosten
- ▶ d) Kapitalverzinsung

Investitions- und Betriebskosten Dieselbus

- ▶ a) Fahrzeug
 - ▶▶ Investition Fahrzeug
 - ▶▶ Ersatzinvestition Fahrzeug
 - ▶▶ Verkaufserlös Fahrzeug
 - ▶▶ Instandhaltung Fahrzeug
 - ▶▶ Reservefahrzeug

Ökonomische Betrachtung

- ▶ b) Infrastruktur
 - ▶▶ Nutzung Tankstelle
- ▶ c) Betriebskosten
 - ▶▶ Fahrpersonal
 - ▶▶ Dieselskosten Betriebseinsatz
 - ▶▶ Heizkosten
 - ▶▶ AdBlue-Kosten
- ▶ d) Kapitalverzinsung

Für die Gegenüberstellung von Elektrobus- und Dieselsbusbetrieb wurden neben den abgezinsten Investitionskosten ebenso die **laufleistungsbezogenen Betriebskosten** integriert. Diese umfassen folgende Kategorien:

- ▶ a) Laufleistungsparameter
 - ▶▶ Jahreskilometerleistung (pro Fahrzeugflotte und Jahr)
 - ▶▶ Jahresbetriebsdauer (pro Fahrzeugflotte und pro Jahr)
- ▶ b) Verbrauchswerte pro km
 - ▶▶ Referenzfahrzeug (Diesel, Heizöl, AdBlue)
 - ▶▶ Elektrofahrzeug (elektrischer Strom, Heizöl)
- ▶ c) Energiekosten
 - ▶▶ Einkaufspreise für Diesel, Heizöl und AdBlue
 - ▶▶ Einkaufspreise für Strom unter Berücksichtigung der aktuellen Rechtslage für Elektrobusse (Gleichsetzung mit Straßenbahn bei Stromsteuer)
- ▶ d) Personalkosten
 - ▶▶ Fahrdienstpersonal
 - ▶▶ Werkstattpersonal (Instandhaltungsmehraufwand)

Da es sich um eine langjährige Vorausschau handelt, in deren Bezugszeitraum teilweise nicht oder nur schwer vorherzusagende Entwicklungen stattfinden, erfolgte die Berechnung in verschiedenen Szenarien. Diesen Szenarien wurden bestimmte Preisentwicklungsmodelle für Dieselskraftstoff, elektrischen Strom und Energiespeichermedien hinterlegt. Es wurde zwischen dem Best-Case-, Middle-Case b-Szenario und Worst-Case-Szenario differenziert. Im Best-Case-Szenario wird eine geringe Kostenentwicklung beim Elektrobus und hohe Kostenentwicklung beim Dieselsbus, beim Middle-Case-Szenario-b eine mittlere Kostenentwicklung beim Elektrobus sowie beim Dieselsbus und im Falle des Worst-Case-Szenario eine hohe Kostenentwicklung beim Elektrobus und nur eine geringe beim Dieselsbus angenommen.

Ökonomische Betrachtung

Die Ergebnisauswertung erfolgte für das Middle-Case b-Szenario, welches das mittlere der drei Szenarien Middle-Case a, b und c repräsentiert. Sämtliche Betriebskosten wurden in Relation zur Laufleistung in die Berechnung integriert. Die laufleistungsbezogenen Elektrobuskosten sowie die beim Elektrobusbetrieb im Vergleich zum Dieselsebusbetrieb entstehenden Mehr- bzw. Minderkosten wurden in €/km ausgewiesen.

7.3.2 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die wirtschaftliche Bewertung des Elektrobuseinsatzes erfolgte für verschiedene Betrachtungsszenarien, wobei die Betriebs- und Investitionskosten nach den folgenden Kriterien ausgewertet wurden:

- ▶ Umfang des geplanten Elektrobuseinsatzes
- ▶ Fördermöglichkeiten
- ▶ Betrachtungszeitraum für Elektrobuseinsatz

In Tabelle 7.3 sind die Rahmendaten zu den drei betrachteten Ausbaustufen (1. und 2. Umstellungsstufe sowie Gesamtumstellung) zusammen-gestellt. Darüber hinaus werden für den Fall der Gesamtumstellung die Kosten auf einen einzelnen Solo- sowie Gelenk-Elektrobus unter Berücksichtigung ihrer durchschnittlichen Laufleistung entsprechend umgelegt.

Betrachtungskriterien	Merkmale
Elektrobuseinsatz	
1. Umstellungsstufe	
▶ Flotte: 15 Elektrobusse	Linien: SB97/952, 953/961, 955 und 956
	Laufleistung: 1.374.166 km/Jahr
2. Umstellungsstufe	
▶ Flotte: 68+4 Elektrobusse	Linien: alle mit Solobussen betriebene Linien

Ökonomische Betrachtung

Betrachtungskriterien	Merkmale
	Laufleistung: 4.229.304 km/Jahr inkl. 23.738 km/Jahr Mehraufwand für E-Bus-Einsatz
Gesamtumstellung	
► Flotte: 120+13 Elektrobusse	Laufleistung: 8.533.000 km/Jahr inkl. 95.513 km/Jahr Mehraufwand für E-Bus-Einsatz
davon 68+4 Solo-Elektrobusse	
davon 52+9 Gelenk-Elektrobusse	
► Einzelfahrzeug	Werte aus Gesamtumstellung ermittelt und umgelegt
1 Standardbus	Laufleistung: 58.740 km/Jahr
1 Gelenkbus	Laufleistung: 70.552 km/Jahr
Förderung	
► Land	60 % Investitionsmehrkosten E-Bus
	90 % Ladeinfrastruktur, Werkstattausrüstung
► Kombi Bund/Land	60 % Land & 20 % Bund Investitionsmehrkosten E-Bus
	90 % Land Ladeinfrastruktur, Werkstattausrüstung
Betrachtungszeitraum	
► 12 Jahre	gemäß Einsatzzeit Elektrobus

Tabelle 7.3: Kriterien für Betrachtungsszenarien

a) TCO für 1. Umstellungsstufe

Die beim Einsatz von 15 Solo-Elektrobussen ermittelten Betriebs- und Investitionskosten sind in Abbildung 7.8 aufgeführt. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgt differenziert für den Elektrobus und Dieselbus, über einen Betrachtungszeitraum von 12 Jahren (gemäß Einsatzzeit Elektrobus) und unter Berücksichtigung verschiedener Förderszenarien. Die detaillierte Kostendarstellung ist dem Anhang 10 zu entnehmen.

Ökonomische Betrachtung

Der Betrachtungsfall entspricht der im Umsetzungskonzept geplanten ersten Umsetzungsstufe, welche bis zum Jahr 2021, den Einsatz von 15 Elektrobussen auf den Linien SB97/952, 953/961, 955 und 961 vorsieht.

Folgende Parameter bestimmen die Wirtschaftlichkeitsberechnung:

- ▶ Flotte: 15 Elektrobusse
 - ▶▶ entspricht 15 Solo-Ektrobussen
 - Linieneinsatz: SB97/952, 953/961, 955 und 956
 - Laufleistung: 1.374.166 km/Jahr
- ▶ Förderung
 - ▶▶ Land
 - ▶▶ Bund/Land
- ▶ Betrachtungszeitraum
 - ▶▶ 12 Jahre, gemäß Einsatzzeit Elektrobus

In Abbildung 7.8 sind die Kosten entsprechend der systemspezifischen Kostenpositionen Fahrzeug, Infrastruktur (Werkstatt, Investition und Instandhaltung der Infrastruktur), Projektkosten, Betriebskosten Strecke sowie Kapitalverzinsung wie in Kapitel 8.3.1 aufgeschlüsselt und aufgeführt. Bei der Auflistung der Betriebs- und Investitionskosten ist generell zu berücksichtigen, dass bei den Investitionskosten nur der Einsatzzeitraum von 12 Jahren berücksichtigt wird. Da für die Ladeinfrastruktur aber ein Abschreibungszeitraum von 20 Jahren bei einer Einsatzzeit von 25 Jahren zugrunde gelegt wird, werden die Investitionskosten der Ladeinfrastruktur nur anteilig berücksichtigt und scheinen damit geringer als bei den reinen Investitionskosten in Kapitel 8.2.

Ökonomische Betrachtung

Stufe 1 - 15 Solobusse		ohne Förderung		mit Förderung	
Kosten Elektrobus		Förderung		VRR	VRR und BMU
Fahrzeug		20.529.194 €		15.296.279 €	13.551.974 €
Infrastruktur		3.686.858 €		404.685 €	404.685 €
Projektkosten		1.194.020 €		616.570 €	616.570 €
Betriebskosten Strecke		37.829.922 €		37.829.922 €	37.829.922 €
Kapitalverzinsung		3.149.308 €		1.222.095 €	960.449 €
Betriebs- und Investitionskosten gesamt		66.389.302 €		55.369.551 €	53.363.601 €
Kosten je km		4,03 €/km		3,36 €/km	3,24 €/km
Kosten Dieselbus					
Fahrzeug		12.198.577 €		12.198.577 €	12.198.577 €
Infrastruktur		258.059 €		258.059 €	258.059 €
Projektkosten					
Betriebskosten Strecke		39.888.989 €		39.888.989 €	39.888.989 €
Kapitalverzinsung		540.000 €		540.000 €	540.000 €
Betriebs- und Investitionskosten gesamt		52.885.625 €		52.885.625 €	52.885.625 €
Kosten je km		3,21 €/km		3,21 €/km	3,21 €/km
Kostenvergleich Elektrobus ggü. Dieselbus					
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten Elektrobus:		0,82 €/km		0,15 €/km	0,03 €/km
Grundlage					
15 Solobusse					
Laufleistung: 1.374.166 km / Jahr					

Abbildung 7.8: Kostenpositionen Betriebs- und Investitionskosten für Stufe 1 – 15 Solo-Elektrobusse

Bewertung der Kostenentwicklungsszenarien

Der Kostenvergleich Elektrobus zum Dieselbus ergab im Best-Case-Szenario einen Kostenmehraufwand für den Elektrobus ohne Förderung und einen Kostenvorteil für beide Förderszenarien.

Im Middle-Case-Szenario wurde ein Kostenmehraufwand von 0,82 €/km ohne Förderung für den Elektrobus ermittelt. Dieser Mehraufwand reduziert sich stark im Falle der Landes-Förderung und für die Kombi-Förderung wird fast Kostenparität erreicht.

Lediglich im Worst-Case-Szenario entstanden beim Elektrobus Kostenmehraufwände sowohl mit als auch ohne Förderung.

Ökonomische Betrachtung

Durchschnittliche Betriebs- und Investitions- kosten	ohne Förderung	mit Förderung	
		VRR	VRR & BMU
Best Case			
Elektrobus	3,90 €/km	3,23 €/km	3,11 €/km
Dieselbus	3,24 €/km	3,24 €/km	3,24 €/km
Mehr- (+)/ Minderkosten (-) Elektrobus:	0,65 €/km	-0,01 €/km	-0,14 €/km
Middle Case b			
Elektrobus	4,03 €/km	3,36 €/km	3,24 €/km
Dieselbus	3,21 €/km	3,21 €/km	3,21 €/km
Mehr- (+)/ Minderkosten (-) Elektrobus:	0,82 €/km	0,15 €/km	0,03 €/km
Worst Case			
Elektrobus	4,16 €/km	3,50 €/km	3,38 €/km
Dieselbus	3,17 €/km	3,17 €/km	3,17 €/km
Mehr- (+)/ Minderkosten (-) Elektrobus:	1,00 €/km	0,33 €/km	0,21 €/km

Abbildung 7.9: Durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten für Stufe 1 – 15 Solo-Elektrobusse – für drei verschiedene Kostenentwicklungsszenarien

b) TCO für 2. Umstellungsstufe

Folgende Parameter bestimmen die Wirtschaftlichkeitsberechnung:

- ▶ Flotte: 68 + 4 Elektrobusse
 - ▶▶ entspricht 72 Solo-Elektrobussen
 - Linieneinsatz: alle mit Solo-Bussen betriebenen Linien
 - Laufleistung: 4.229.304 km/Jahr
 - Diesel-Laufleistung: 4.205.566 km/Jahr
- ▶ Förderung
 - ▶▶ Land
 - ▶▶ Bund/Land
- ▶ Betrachtungszeitraum
 - ▶▶ 12 Jahre, gemäß Einsatzzeit Elektrobus

Ökonomische Betrachtung

In Abbildung 7.10 sind die aufgeschlüsselten Kosten entsprechend der systemspezifischen Kostenpositionen aufgeführt.

Stufe 2 - 68 + 4 Solobusse		ohne Förderung		mit Förderung	
Kosten Elektrobus		Förderung	VRR	VRR und BMU	
Fahrzeug		84.934.054 €	59.816.062 €	51.443.398 €	
Infrastruktur		16.107.329 €	1.665.355 €	1.665.355 €	
Projektkosten		2.459.583 €	1.249.352 €	1.249.352 €	
Betriebskosten Strecke		114.991.154 €	114.991.154 €	114.991.154 €	
Kapitalverzinsung		14.156.568 €	5.770.045 €	4.514.145 €	
Betriebs- und Investitionskosten gesamt		232.648.688 €	183.491.968 €	173.863.404 €	
Kosten je km		4,58 €/km	3,62 €/km	3,43 €/km	
Kosten Dieselbus					
Fahrzeug		42.317.373 €	42.317.373 €	42.317.373 €	
Infrastruktur		789.778 €	789.778 €	789.778 €	
Projektkosten					
Betriebskosten Strecke		120.390.513 €	120.390.513 €	120.390.513 €	
Kapitalverzinsung		2.448.000 €	2.448.000 €	2.448.000 €	
Betriebs- und Investitionskosten gesamt		165.945.663 €	165.945.663 €	165.945.663 €	
Kosten je km		3,29 €/km	3,29 €/km	3,29 €/km	
Kostenvergleich Elektrobus ggü. Dieselbus					
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten Elektrobus:		1,30 €/km	0,33 €/km	0,14 €/km	
Grundlage					
68 + 4 Solobusse					
Laufleistung: 4.229.304 km / Jahr (inkl. 23.738 km/Jahr Laufleistungserhöhung durch E-Bus-Einsatz)					

Abbildung 7.10: Kostenpositionen Betriebs- und Investitionskosten für Stufe 2 - 68+4 Solo-Elektrobusse

Bewertung der Kostenentwicklungsszenarien

Der Kostenvergleich Elektrobus zum Dieselbus ergab im Best-Case-Szenario einen Kostenmehraufwand für den Elektrobus ohne Förderung sowie für die Landes-Förderung und einen ganz leichten Kostenvorteil für die Bundes-/Landes-Förderung.

Im Middle-Case-Szenario wurde ein Kostenmehraufwand sowohl mit als auch ohne Förderung ermittelt.

Dieser Mehraufwand erhöht sich im Worst-Case-Szenario noch weiter im Vergleich zum Middle-Case-Szenario.

Ökonomische Betrachtung

Durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten	ohne Förderung	mit Förderung	
		VRR	VRR & BMU
Best Case			
Elektrobus	4,44 €/km	3,47 €/km	3,29 €/km
Dieselbus	3,32 €/km	3,32 €/km	3,32 €/km
Mehr- (+)/ Minderkosten (-) Elektrobus:	1,12 €/km	0,15 €/km	-0,04 €/km
Middle Case b			
Elektrobus	4,58 €/km	3,62 €/km	3,43 €/km
Dieselbus	3,29 €/km	3,29 €/km	3,29 €/km
Mehr- (+)/ Minderkosten (-) Elektrobus:	1,30 €/km	0,33 €/km	0,14 €/km
Worst Case			
Elektrobus	4,73 €/km	3,77 €/km	3,58 €/km
Dieselbus	3,25 €/km	3,25 €/km	3,25 €/km
Mehr- (+)/ Minderkosten (-) Elektrobus:	1,49 €/km	0,52 €/km	0,33 €/km

Abbildung 7.11: Durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten für Stufe 2 (68 + 4 Solo-Elektrobusse) für drei verschiedene Kostenentwicklungsszenarien

c) TCO für Gesamtumstellung

Folgende Parameter bestimmen die Wirtschaftlichkeitsberechnung:

- ▶ Flotte: 68 + 4 Solo-Elektrobusse und 52 + 9 Gelenk-Elektrobusse
 - ▶▶ Linieneinsatz: alle Linien
 - ▶▶ Laufleistung: 8.533.000 km/Jahr
 - ▶▶ Diesel-Laufleistung: 8.437.487 km/Jahr
- ▶ Förderung
 - ▶▶ Land
 - ▶▶ Bund/Land
- ▶ Betrachtungszeitraum
 - ▶▶ 12 Jahre, gemäß Einsatzzeit Elektrobus

In Abbildung 7.12 sind die aufgeschlüsselten Kosten entsprechend der systemspezifischen Kostenpositionen aufgeführt.

Ökonomische Betrachtung

Gesamtumstellung - 68 +4 Solo- und 52 + 9 Gelenkbusse Kosten Elektrobus	ohne Förderung	mit Förderung	
		VRR	VRR und BMU
Fahrzeug	175.905.876 €	124.436.982 €	107.280.684 €
Infrastruktur	23.622.623 €	2.437.319 €	2.437.319 €
Projektkosten	3.392.785 €	1.715.953 €	1.715.953 €
Betriebskosten Strecke	221.508.535 €	221.508.535 €	221.508.535 €
Kapitalverzinsung	25.646.442 €	11.858.591 €	9.285.146 €
Betriebs- und Investitionskosten gesamt	450.076.261 €	361.957.380 €	342.227.638 €
Kosten je km	4,40 €/km	3,53 €/km	3,34 €/km
Kosten Dieselbus			
Fahrzeug	86.082.195 €	86.082.195 €	86.082.195 €
Infrastruktur	1.849.414 €	1.849.414 €	1.849.414 €
Projektkosten			
Betriebskosten Strecke	237.376.254 €	237.376.254 €	237.376.254 €
Kapitalverzinsung	5.100.000 €	5.100.000 €	5.100.000 €
Betriebs- und Investitionskosten gesamt	330.407.863 €	330.407.863 €	330.407.863 €
Kosten je km	3,26 €/km	3,26 €/km	3,26 €/km
Kostenvergleich Elektrobus ggü. Dieselbus			
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten Elektrobus:	1,14 €/km	0,27 €/km	0,08 €/km
Grundlagen			
68 + 4 Solobusse			
Laufleistung: 4.229.304 km / Jahr (inkl. 23.738 km/Jahr Laufleistungserhöhung durch E-Bus-Einsatz)			
52 + 9 Gelenkbusse			
Laufleistung: 4.303.696 km / Jahr (inkl. 71.775 km/Jahr Laufleistungserhöhung durch E-Bus-Einsatz)			

Abbildung 7.12: Kostenpositionen Betriebs- und Investitionskosten für Gesamtumstellung - 68 + 4 Solo-Elektrobusse sowie 52 + 9 Gelenk-Elektrobusse

Bewertung der Kostenentwicklungsszenarien

Der Kostenvergleich Elektrobus zum Dieselbus ergab im Best-Case-Szenario einen Kostenmehraufwand für den Elektrobus ohne Förderung, der sich jedoch im Falle der Landes-Förderung deutlich reduziert. Für die Bundes-/Landes-Förderung ergibt sich ein kleiner Kostenvorteil für den Elektrobus.

Im Middle-Case-Szenario wurde ein Kostenmehraufwand sowohl mit als auch ohne Förderung ermittelt, wobei dieser im Falle der Kombi-Förderung relativ klein ist.

Dieser Mehraufwand erhöht sich im Worst-Case-Szenario noch weiter im Vergleich zum Middle-Case-Szenario.

Ökonomische Betrachtung

Durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten	ohne Förderung	mit Förderung	
		VRR	VRR & BMU
Best Case			
Elektrobus	4,25 €/km	3,39 €/km	3,20 €/km
Dieselsbus	3,31 €/km	3,31 €/km	3,31 €/km
Mehr- (+)/ Minderkosten (-) Elektrobus:	0,95 €/km	0,08 €/km	-0,11 €/km
Middle Case b			
Elektrobus	4,40 €/km	3,53 €/km	3,34 €/km
Dieselsbus	3,26 €/km	3,26 €/km	3,26 €/km
Mehr- (+)/ Minderkosten (-) Elektrobus:	1,14 €/km	0,27 €/km	0,08 €/km
Worst Case			
Elektrobus	4,55 €/km	3,69 €/km	3,50 €/km
Dieselsbus	3,22 €/km	3,22 €/km	3,22 €/km
Mehr- (+)/ Minderkosten (-) Elektrobus:	1,33 €/km	0,47 €/km	0,28 €/km

Abbildung 7.13: Durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten für Gesamtumstellung (68 + 4 Solo- und 52 + 9 Gelenk-Elektrobuse) für drei verschiedene Kostenentwicklungsszenarien

d) TCO für Einzelfahrzeuge

In den Abbildungen 8.14 und 8.15 sind die durchschnittlichen Betriebs- und Investitionskosten aus der Gesamtumstellung der Flotte auf einen einzelnen Solo- sowie einen einzelnen Gelenk-Elektrobus entsprechend der Laufleistungen umgelegt.

Ökonomische Betrachtung

1 Solobus	ohne Förderung	mit Förderung	
Kosten Elektrobus		VRR	VRR und BMU
Fahrzeug	1.179.640 €	830.779 €	714.492 €
Infrastruktur	177.614 €	18.326 €	18.326 €
Projektkosten	25.510 €	12.902 €	12.902 €
Betriebskosten Strecke	1.665.478 €	1.665.478 €	1.665.478 €
Kapitalverzinsung	192.830 €	89.162 €	69.813 €
Betriebs- und Investitionskosten gesamt	3.241.071 €	2.616.646 €	2.481.010 €
Kosten je km	4,60 €/km	3,71 €/km	3,52 €/km
Kosten Dieselbus			
Fahrzeug	622.314 €	622.314 €	622.314 €
Infrastruktur	15.412 €	15.412 €	15.412 €
Projektkosten			
Betriebskosten Strecke	1.978.135 €	1.978.135 €	1.978.135 €
Kapitalverzinsung	42.500 €	42.500 €	42.500 €
Betriebs- und Investitionskosten gesamt	2.658.362 €	2.658.362 €	2.658.362 €
Kosten je km	3,58 €/km	3,58 €/km	3,58 €/km
Kostenvergleich Elektrobus ggü. Dieselbus			
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten Elektrobus:	1,02 €/km	0,13 €/km	-0,06 €/km
Rahmendaten			
1 Solo-Bus mit gemittelten Werten aus der Gesamtumstellung			
Laufleistung Dieselbus	61.847 km/Jahr		
Laufleistung Elektrobus	58.740 km/Jahr		

Abbildung 7.14: Betriebs- und Investitionskosten für 1 Solo-Elektrobus von Gesamtumstellung ausgehend

Aus dem Vergleich der umgelegten durchschnittlichen Kosten zwischen Solo- und Gelenk-Elektrobus fallen zunächst zwei Aspekte auf. Sowohl der Diesel- als auch der Elektrobus als Solobus hat verglichen mit dem Gelenkbus deutlich höhere Betriebskosten (€/km). Eine mögliche Ursache dafür liegt in den deutlich geringeren Laufleistungen der Solobusse (sowohl als Dieselbus als auch als Elektrobus).

Ökonomische Betrachtung

1 Gelenkbus		ohne Förderung		mit Förderung	
Kosten Elektrobus			VRR	VRR und BMU	
Fahrzeug		1.491.341 €	1.059.359 €	915.365 €	
Infrastruktur		177.614 €	18.326 €	18.326 €	
Projektkosten		25.510 €	12.902 €	12.902 €	
Betriebskosten Strecke		1.665.478 €	1.665.478 €	1.665.478 €	
Kapitalverzinsung		192.830 €	89.162 €	69.813 €	
Betriebs- und Investitionskosten gesamt		3.552.773 €	2.845.227 €	2.681.884 €	
Kosten je km		4,20 €/km	3,36 €/km	3,17 €/km	
Kosten Dieselbus					
Fahrzeug		841.631 €	841.631 €	841.631 €	
Infrastruktur		15.412 €	15.412 €	15.412 €	
Projektkosten					
Betriebskosten Strecke		1.978.135 €	1.978.135 €	1.978.135 €	
Kapitalverzinsung		42.500 €	42.500 €	42.500 €	
Betriebs- und Investitionskosten gesamt		2.877.678 €	2.877.678 €	2.877.678 €	
Kosten je km		2,95 €/km	2,95 €/km	2,95 €/km	
Kostenvergleich Elektrobus ggü. Dieselbus					
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten Elektrobus:		1,25 €/km	0,41 €/km	0,22 €/km	
Rahmendaten					
1 Gelenk-Bus mit gemittelten Werten aus der Gesamtumstellung					
Laufleistung Dieselbus		81.383 km/Jahr			
Laufleistung Elektrobus		70.552 km/Jahr			

Abbildung 7.15: Betriebs- und Investitionskosten für 1 Gelenk-Elektrobus von Gesamtumstellung ausgehend

Bewertung der Kostenentwicklungsszenarien

Solobus:

Der Kostenvergleich Elektrobus zum Dieselbus ergab im Best-Case-Szenario einen Kostenmehraufwand für den Elektrobus ohne Förderung. Für die Landes-Förderung als auch die kombinierte Bundes-/Landes-Förderung ergibt sich ein Kostenvorteil für den Elektrobus.

Im Middle-Case-Szenario wurde ein Kostenmehraufwand sowohl ohne Förderung als auch mit Landes-Förderung ermittelt, der sich jedoch durch die Förderung deutlich reduziert. Für die Kombi-Förderung ergibt sich ein Kostenvorteil des Elektrobusses gegenüber dem Dieselbus.

Dieser Mehraufwand tritt im Worst-Case-Szenario ohne Förderung als auch für beide Förderoptionen auf.

Ökonomische Betrachtung

Durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten	ohne Förderung	mit Förderung	
		VRR	VRR & BMU
Best Case			
Elektrobus	4,44 €/km	3,56 €/km	3,36 €/km
Dieselbus	3,63 €/km	3,63 €/km	3,63 €/km
Mehr- (+)/ Minderkosten (-) Elektrobus:	0,81 €/km	-0,07 €/km	-0,27 €/km
Middle Case b			
Elektrobus	4,60 €/km	3,71 €/km	3,52 €/km
Dieselbus	3,58 €/km	3,58 €/km	3,58 €/km
Mehr- (+)/ Minderkosten (-) Elektrobus:	1,02 €/km	0,13 €/km	-0,06 €/km
Worst Case			
Elektrobus	4,77 €/km	3,88 €/km	3,69 €/km
Dieselbus	3,53 €/km	3,53 €/km	3,53 €/km
Mehr- (+)/ Minderkosten (-) Elektrobus:	1,24 €/km	0,35 €/km	0,16 €/km

Abbildung 7.16: Durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten für einen einzelnen Solo-Elektrobus im Rahmen der Gesamtumstellung für drei verschiedene Kostenentwicklungsszenarien

Gelenkbus:

Der Kostenvergleich Elektrobus zum Dieselbus ergab im Best-Case-Szenario einen Kostenmehraufwand für den Elektrobus sowohl ohne als auch mit Förderung, wobei er im Falle der Kombi-Förderung nur gering ausfällt.

Im Middle-Case-Szenario erhöht sich der Kostenmehraufwand des Elektrobus im Vergleich zum Best-Case-Szenario.

Im Worst-Case-Szenario ist der Mehraufwand sowohl ohne Förderung als auch für beide Förderoptionen am höchsten.

Der prozentual betrachtet relativ hohe Kostenmehraufwand im Falle des Gelenkbusses resultiert auch aus dem deutlich größeren Mehrbedarf an Fahrzeugen (9 zusätzliche Gelenkbusse gegenüber 4 zusätzlichen Solobussen) und der damit deutlich reduzierten Fahrleistung pro Gelenk-Elektrobus gegenüber dem Gelenk-Dieselbus um etwa 9 Tkm gegenüber einer Differenz von nur rund 3 Tkm im Falle des Solobusses.

Ökonomische Betrachtung

Durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten	ohne Förderung	mit Förderung	
		VRR	VRR & BMU
Best Case			
Elektrobus	4,06 €/km	3,23 €/km	3,04 €/km
Dieselbus	2,98 €/km	2,98 €/km	2,98 €/km
Mehr- (+)/ Minderkosten (-) Elektrobus:	1,08 €/km	0,24 €/km	0,05 €/km
Middle Case b			
Elektrobus	4,20 €/km	3,36 €/km	3,17 €/km
Dieselbus	2,95 €/km	2,95 €/km	2,95 €/km
Mehr- (+)/ Minderkosten (-) Elektrobus:	1,25 €/km	0,41 €/km	0,22 €/km
Worst Case			
Elektrobus	4,34 €/km	3,50 €/km	3,31 €/km
Dieselbus	2,91 €/km	2,91 €/km	2,91 €/km
Mehr- (+)/ Minderkosten (-) Elektrobus:	1,43 €/km	0,59 €/km	0,40 €/km

Abbildung 7.17: Durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten für einen einzelnen Gelenk-Elektrobus im Rahmen der Gesamtumstellung für drei verschiedene Kostenentwicklungsszenarien

7.4 Festlegungen der STOAG nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie

Im Zuge der Erarbeitung der Machbarkeitsstudie wurde der Endpunkt Anne-Frank-Realschule als geeigneter Ladestandort ermittelt und zur Nachladung der Linien SB97/952 und 955 herangezogen. Durch die STOAG wurde nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie beschlossen, dass der Endpunkt Anne-Frank-Realschule vorerst nicht als Ladepunkt realisiert werden kann. Daraus ergeben sich folgende Änderungen, die in den Ausführungen dieser Machbarkeitsstudie nicht berücksichtigt wurden:

- ▶ Die Umstellung der Linie 955 auf Elektrobusbetrieb erfolgt nicht in Umsetzungsstufe 1, sondern zu einem späteren Zeitpunkt (voraussichtlich in Umsetzungsstufe 2).
- ▶ Alternativ zum Endpunkt Anne-Frank-Realschule sollen die Endpunkte Everslohstraße (Linie SB97/952, Stufe 1) und Heinrich-Böll-Gesamtschule (Linie 955, Stufe 2) als Ladepunkte ausgebaut werden.

8 Ökologische Betrachtung / Umweltbilanzierung

8.1 Grundlagen der ökologischen Betrachtung

Ein zentrales Motiv für Untersuchungen zur Umstellung von fossil betriebenen Bussystemen auf Elektrobussysteme sind ökologische Effekte.

Die ökologische Bewertung liefert eine laufleistungsbezogene CO₂-Bilanzierung als Vergleichsdarstellung zwischen der Dieselbusflotte auf der einen und der Elektrobussflotte mit verschiedenen Strommischen (lokaler Erzeuger, bundesdeutscher Durchschnitt aktuell / Prognose 2020, Ökostrom) auf der anderen Seite.

Die Energieverbräuche werden in folgende Wirkungsketten differenziert:

- ▶ Well-to-Wheel in Zusammenführung der Teilketten
 - ▶▶ Well-to-Tank und
 - ▶▶ Tank-to-Wheel.

Bei allen Betrachtungen werden der Energieverbrauch und die Menge an CO₂-Äquivalent auf Grundlage der DIN EN 16258 (2013) sowie die Kosten der CO₂-Äquivalent-Ausstöße nach Standardisierter Bewertung dargestellt. Die Energieketten des Referenzbusses und des Elektrobusses werden für die ausgewählten Umläufe auf Grundlage der ermittelten Energiewerte verglichen.

Für den Referenzbus werden zusätzlich die lokalen Schadstoffemissionen von Stickoxiden NO_x, Feinstaub (PM), Kohlenmonoxid CO und Kohlenwasserstoffen HC mengenmäßig ermittelt und dargestellt. Diese werden direkt im Straßenverkehr lokal emittiert und fließen daher ausschließlich in die Tank-to-Wheel-Betrachtung ein.

Abschließend erfolgt die Monetarisierung der Emissionen auf Basis der Verfahrensanleitung zur Standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs und die Berechnung der Treibhausgas-Vermeidungskosten aus der Differenz von Technologiezusatzkosten und eingesparten Energiekosten im Verhältnis zur erzielten Reduktion des Ausstoßes von CO₂-Äquivalenten (EUR/t CO₂-e).

Ökologische Betrachtung / Umweltbilanzierung

Die Treibhausgasvermeidungskosten zeigen, zu welchen Kosten die Treibhausgasemissionen um 1 Tonne CO₂-e verringert werden können (€/Tonne CO₂-e). Damit wird ein Vergleich der Kosteneffizienz zur Emissionsminderung zwischen Maßnahmen im Verkehr, aber auch z. B. mit Maßnahmen aus anderen Bereichen möglich. Die spezifischen Treibhausgasvermeidungskosten fahrzeugbezogener Maßnahmen berechnen sich als Quotient aus der Änderung der Fahrzeugkosten und den insgesamt erreichbaren Treibhausminderungen über einen festgelegten Zeitraum.

Zur Berechnung der spezifischen Treibhausgasvermeidungskosten (€/Tonne CO₂-e) werden zum einen die pro Fahrzeug erreichbaren Treibhausgasminderungen entsprechend der spezifischen Minderungspotenziale berechnet (CO₂-e "Well-to-Wheel" mit Faktoren gemäß DIN EN 16258). Zum anderen werden die aus Zusatzkosten und Kraftstoffeinsparungen insgesamt resultierenden Änderungen der Fahrzeugkosten ermittelt. Anschließend werden die Differenzkosten durch die Treibhausgasminderung dividiert.

Dem „Leitfaden zur Anwendung der DIN EN 16258“ ist folgende Definition zur Bildung des CO₂-Äquivalents zu entnehmen.

„Kohlendioxid (CO₂) ist das Treibhausgas mit den weitreichendsten Auswirkungen. CO₂ und Treibhausgas (THG) werden daher oftmals synonym verwendet. Neben Kohlendioxid sind laut Kyoto-Protokoll aber noch fünf weitere Treibhausgase relevant: Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW), perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) und Schwefelhexafluorid (SF₆). Während Methan und Distickstoffoxid bei der Verbrennung von Öl, Gas oder Kraftstoffen entstehen, werden die letztgenannten Spurengase oftmals durch industrielle Prozesse verursacht oder gelangen direkt bei deren Nutzung in die Umwelt (z. B. Fluorkohlenwasserstoffe als Kältemittel). Da diese fünf weiteren Treibhausgase bei gleicher Menge die Atmosphäre weitaus stärker aufheizen als Kohlendioxid, sollten sie in keiner Klimabilanz fehlen. Allerdings wäre es unübersichtlich, alle sechs Gase getrennt zu listen. Daher werden sie in so genannte CO₂-Äquivalente umgerechnet und addiert.“

Der Umweltbewertung liegen die in Abbildung 9.1 aufgeführten Berechnungsparameter zugrunde. Entsprechend der Umsetzungsstufen werden die spezifischen Laufleistungen herangezogen.

Ökologische Betrachtung / Umweltbilanzierung

Energieverbrauch			
		Traktion	Heizung (Diesel)
Dieselbus	1 Standardbus	36 l/100 km	
	1 Gelenkbus	48 l/100 km	
Elektrobus	1 Standardbus	140 - 163 kWh/100 km	
	1 Gelenkbus	183 - 211 kWh/100 km	

Faktoren zur Umrechnung von Energieverbrauchsdaten in standardisierte Energiemenge (MJ)			
	Well-to-Tank	Tank-to-Wheel	Well-to-Wheel
Diesel Deutschland	6,80 MJ/l	35,90 MJ/l	42,70 MJ/l
Stromkennzeichnung evo	5,42 MJ/kWh	3,60 MJ/kWh	9,02 MJ/kWh

Faktoren zur Umrechnung von Energieverbrauchsdaten in standardisierte Treibhausgasemissionen (kg)			
	Well-to-Tank	Tank-to-Wheel	Well-to-Wheel
Diesel Deutschland	0,570 kg CO ₂ e/l	2,670 kg CO ₂ e/l	3,240 kg CO ₂ e/l
Stromkennzeichnung evo	0,036 kg CO ₂ e/kWh	0,000 kg CO ₂ e/kWh	0,036 kg CO ₂ e/kWh

Einheitskosten für Schadstoffemissionen			
Diesel	0,145 €/kg		

Emissionsfaktoren (HBEFA)			
	Tank-to-Wheel		
CO	0,686 g/km		
HC	0,059 g/km		
NO _x	3,332 g/km		
PM	0,038 g/km		

Abbildung 8.1: Berechnungsparameter für Umweltbewertung

Die Ergebnisse der Ökologiebetrachtung, differenziert nach verschiedenen Betrachtungsszenarien, sind im Anhang 11 aufgeführt.

8.2 Ergebnisse der ökologischen Betrachtung

Stufe 1

Der Berechnung wird eine Laufleistung von 1.374.166 km für 15 Elektrobusse und gleichfalls für 15 Dieselbusse zugrunde gelegt.

Der Einsatz von 15 Dieselbussen erzeugt Emissionen in Höhe 1.602.827 kg CO₂-Äquivalent pro Jahr. Nach Umstellung der Linien auf Elektrobusbetrieb sinkt der Emissionswert auf nur noch 165.011 kg CO₂-Äquivalent. Dies entspricht einer Gesamteinsparung von 90 %. Die Gemeinkostenersparnis beträgt 208.483 €.

Die Treibhausgasvermeidungskosten betragen im Middle-Case-b-Szenario 565 €/t CO₂-e.

Ökologische Betrachtung / Umweltbilanzierung

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung des Elektrobuseinsatzes sind in Abbildung 8.2 und Abbildung 8.3 aufgeführt.

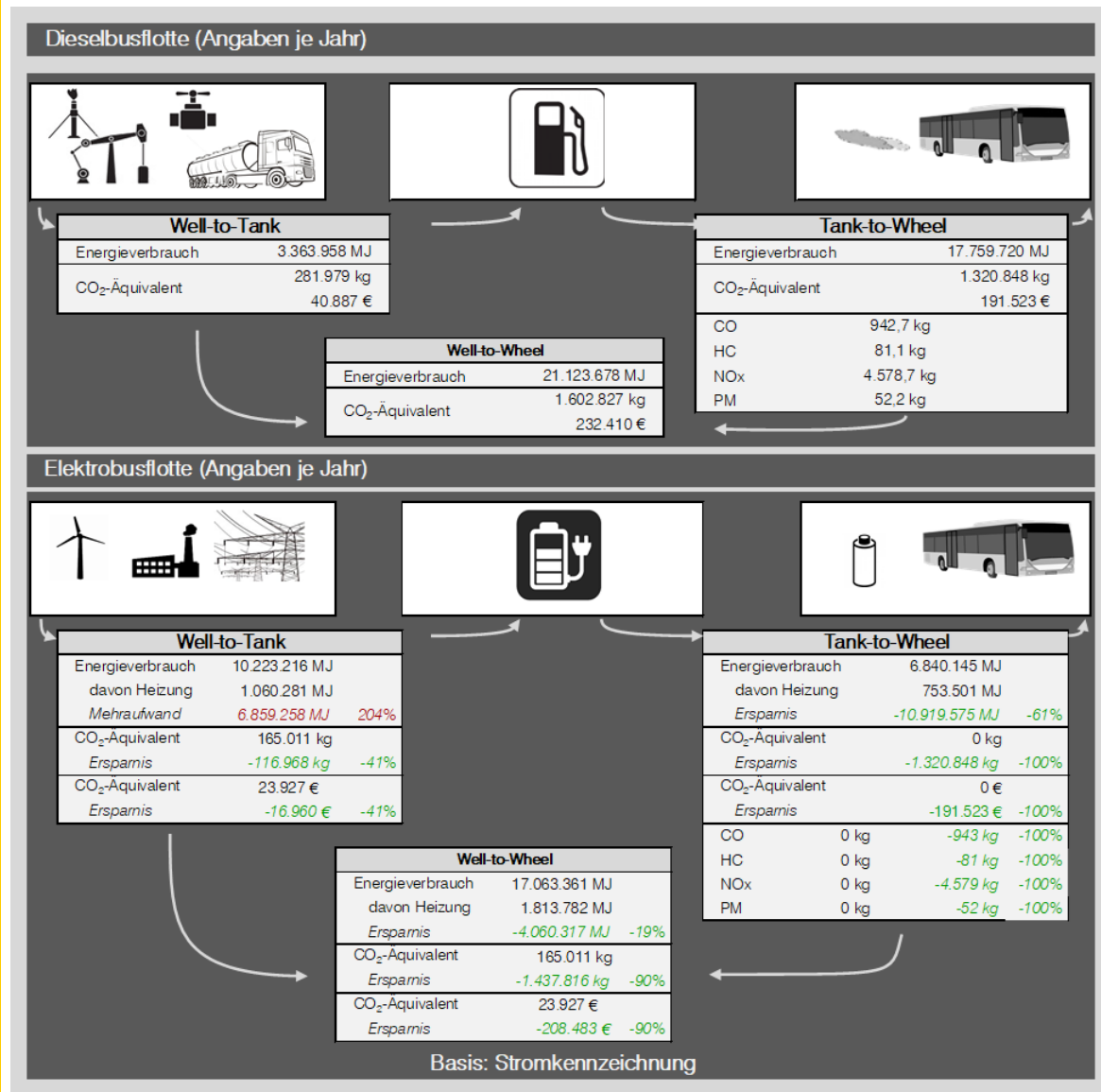


Abbildung 8.2: Ökologische Betrachtung (Well-to-Wheel-Kette) _Stufe 1

Ökologische Betrachtung / Umweltbilanzierung

Treibhausgas- vermeidungs- kosten	Betrachtungszeitraum 'Einsatzzeit Elektrobus' (12 Jahre)
Best-Case Szenario	407 €/t CO ₂ -e
Middle-Case-a Szenario	479 €/t CO ₂ -e
Middle-Case-b Szenario	565 €/t CO ₂ -e
Middle-Case-c Szenario	663 €/t CO ₂ -e
Worst-Case Szenario	735 €/t CO ₂ -e

Abbildung 8.3: Treibhausgasvermeidungskosten _Stufe 1

Ökologische Betrachtung / Umweltbilanzierung

Stufe 2

Der Berechnung wird eine Laufleistung von 4.229.304 km für 72 Elektrobusse und 4.205.566 km für 68 Dieselbusse zugrunde gelegt.

Der Einsatz von 68 Dieselnissen erzeugt Emissionen in Höhe 4.905.372 kg CO₂-Äquivalent pro Jahr. Nach Umstellung der Linien auf Elektrobusbetrieb sinkt der Emissionswert auf nur noch 503.002 kg CO₂-Äquivalent. Dies entspricht einer Gesamteinsparung von 90 %. Die Gemeinkostenersparnis beträgt 638.344 €.

Die Treibhausgasvermeidungskosten betragen im Middle-Case-b-Szenario 994 €/t CO₂-e.

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung des Elektrobuseinsatzes sind in Abbildung 8.4 und Abbildung 8.5 aufgeführt.

Ökologische Betrachtung / Umweltbilanzierung

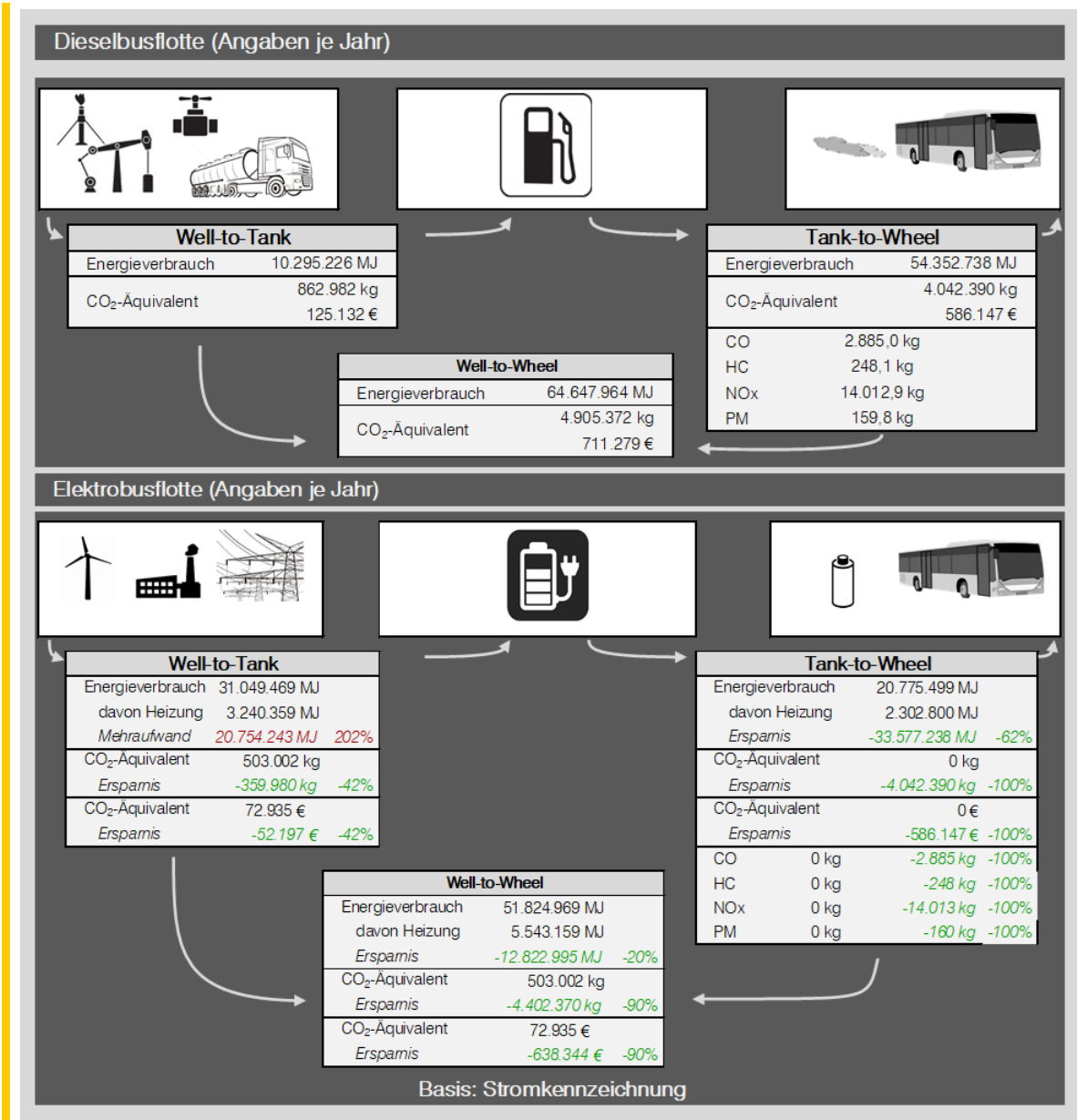


Abbildung 8.4: Ökologische Betrachtung (Well-to-Wheel-Kette) - Stufe 2

Ökologische Betrachtung / Umweltbilanzierung

Treibhausgas- vermeidungs- kosten	Betrachtungszeitraum 'Einsatzzeit Elektrobus' (12 Jahre)
Best-Case Szenario	825 €/t CO ₂ -e
Middle-Case-a Szenario	896 €/t CO ₂ -e
Middle-Case-b Szenario	994 €/t CO ₂ -e
Middle-Case-c Szenario	1.104 €/t CO ₂ -e
Worst-Case Szenario	1.176 €/t CO ₂ -e

Abbildung 8.5: Treibhausgasvermeidungskosten _Stufe 2

Ökologische Betrachtung / Umweltbilanzierung

Gesamtumstellung

Der Berechnung wird eine Laufleistung von 4.229.304 km für 133 Elektrobusse und von 4.205.566 km für 120 Dieselbusse zugrunde gelegt.

Der Einsatz von 120 Dieselbussen erzeugt Emissionen in Höhe 11.486.855 kg CO₂-Äquivalent pro Jahr. Nach Umstellung der Linien auf Elektrobusbetrieb sinkt der Emissionswert auf nur noch 1.299.380 kg CO₂-Äquivalent. Dies entspricht einer Gesamteinsparung von 89 %. Die Gemeinkostenersparnis beträgt 1.477.184 €.

Die Treibhausgasvermeidungskosten betragen im Middle-Case-b-Szenario 783 €/t CO₂-e.

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung des Elektrobuseinsatzes sind in Abbildung 8.6 und Abbildung 8.7 aufgeführt.

Ökologische Betrachtung / Umweltbilanzierung

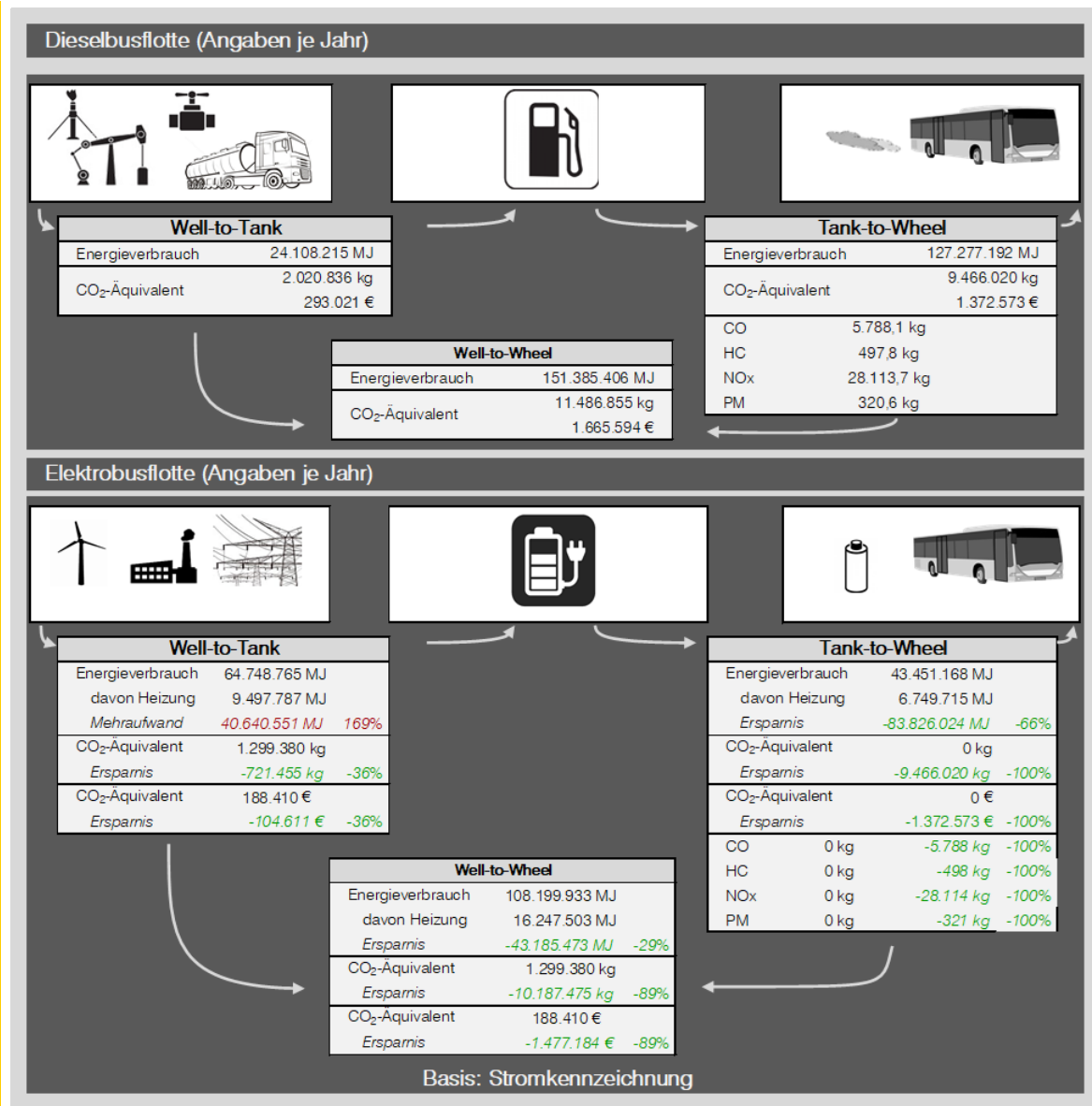


Abbildung 8.6: Ökologische Betrachtung (Well-to-Wheel-Kette) _Gesamtumstellung

Ökologische Betrachtung / Umweltbilanzierung

Treibhausgasvermeidungskosten	Betrachtungszeitraum 'Einsatzzeit Elektrobus' (12 Jahre)
Best-Case Szenario	627 €/t CO ₂ -e
Middle-Case-a Szenario	700 €/t CO ₂ -e
Middle-Case-b Szenario	783 €/t CO ₂ -e
Middle-Case-c Szenario	877 €/t CO ₂ -e
Worst-Case Szenario	950 €/t CO ₂ -e

Abbildung 8.7: Treibhausgasvermeidungskosten _Stufe 3

8.3 Festlegungen der STOAG nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie

Im Zuge der Erarbeitung der Machbarkeitsstudie wurde der Endpunkt Anne-Frank-Realschule als geeigneter Ladestandort ermittelt und zur Nachladung der Linien SB97/952 und 955 herangezogen. Durch die STOAG wurde nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie beschlossen, dass der Endpunkt Anne-Frank-Realschule vorerst nicht als Ladepunkt realisiert werden kann. Daraus ergeben sich folgende Änderungen, die in den Ausführungen dieser Machbarkeitsstudie nicht berücksichtigt wurden:

- ▶ Die Umstellung der Linie 955 auf Elektrobusbetrieb erfolgt nicht in Umsetzungsstufe 1, sondern zu einem späteren Zeitpunkt (voraussichtlich in Umsetzungsstufe 2).
- ▶ Alternativ zum Endpunkt Anne-Frank-Realschule sollen die Endpunkte Everslohstraße (Linie SB97/952, Stufe 1) und Heinrich-Böll-Gesamtschule (Linie 955, Stufe 2) als Ladepunkte ausgebaut werden.

9 Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

9.1 Elektrisches Antriebskonzept

9.1.1 Überblick

Spricht man heute über alternative Antriebe für den Busverkehr, ist hiermit in aller Regel eine Elektrifizierung des Antriebsstrangs gemeint, welche die lokalen Emissionen auf nahezu null senkt und bei Einsatz erneuerbarer Energien zumindest die theoretische Option auf ein „Zero-Emission-Vehicle“ bietet.

Entsprechend dem gegenwärtigen Diskurs zur Elektromobilität werden im Folgenden die Begriffe „Batterie“ und „Akkumulator“ synonym verwendet. Die Bezeichnung von wieder aufladbaren Energiespeichern als „Batterie“ hat sich trotz der gewissen begrifflichen Unschärfe als Konsens auch im wissenschaftlichen Umfeld etabliert.

Als Elektrobusse werden im Folgenden straßengebundene Fahrzeuge des ÖPNV bezeichnet, die über einen elektrischen Hauptantrieb verfügen. In holistischer Betrachtung der Antriebskonzepte wird zwischen folgenden Elektrobustypen unterschieden:

- ▶ Batteriebus
- ▶ (Plug-In)-Hybridbus
- ▶ Oberleitungsbus
- ▶ Brennstoffzellenbus

Die Elektrobustypen werden zudem nach der Antriebskonfektionierung und den Energiezuführungskonzepten weiter differenziert. In folgender Abbildung 9.1 sind die verschiedenen Konfigurationsmöglichkeiten für den Elektrobus aufgezeigt. Allen Elektrobussen gemein ist die Möglichkeit der Rückgewinnung von Bremsenergie (Rekuperation).

Die daraus resultierende dynamische Ladung des elektrischen Energiespeichers hat sich im praktischen Umfeld als günstig erwiesen. Diese Art der Leistungsverzweigung dient der Effizienzsteigerung und Reichweitenoptimierung. Rekuperationsraten von 75 % der abgerufenen kinetischen

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

Energie sind unter Optimalbedingungen realisierbar, sodass die Rekuperation in praktisch allen elektrischen Bussen zum Einsatz kommt.

In dieser Machbarkeitsstudie wird der Fokus auf den Einsatz batterieelektrischer Busse gelegt. (Plug-In)-Hybridbusse, Oberleitungsbusse und Brennstoffzellenbusse sind demnach nicht Bestandteil der im Folgenden durchgeführten Grundlagen-Technologiebetrachtung.

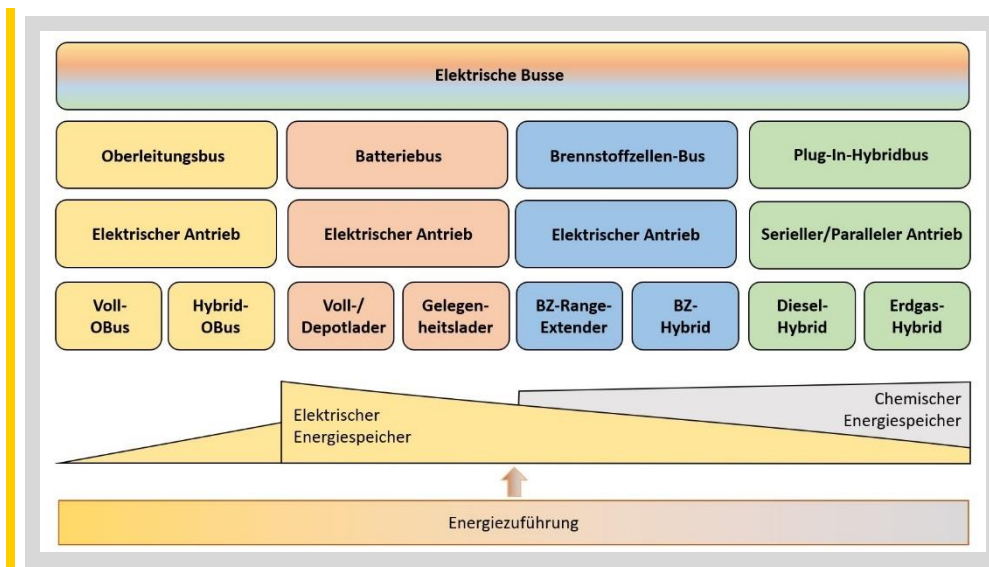


Abbildung 9.1: Konfigurationsmöglichkeiten Elektrobuss

9.1.2 Batteriebus

Ein Batteriebus ist ein batteriebetriebenes Elektrofahrzeug, das ausschließlich mit einem Elektromotor ausgestattet ist und seine Antriebsenergie aus einer Batterie, d. h. einem elektrochemischen Energiespeicher, im Fahrzeug bezieht. Das Aufladen dieses Energiespeichers erfolgt über das Stromnetz.

Bei Batteriebussen wird die Reichweite grundsätzlich durch die zur Verfügung stehende elektrische Energiespeicherkapazität bestimmt. Einen signifikanten Einfluss auf die Energiebilanz und demnach die Auslegung des Energiespeichers hat die Liniencharakteristik, die unter anderem durch die Umlauflänge, die Einsatzzeit, die Topographie und die Fahrcharakteristik bestimmt wird. Zudem bestimmen die Nebenaggregate im Fahrzeug, wie das Heizungs- und Klimatisierungssystem und das Bordnetz, maßgeblich den Energieverbrauch. Auf Basis der erfolgten Energiebilanzierung können das für den Anwendungsfall optimale Betriebskonzept und die Ladestrategie definiert werden.

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

Batteriebusse werden entsprechend der Ladestrategie und somit der Batteriekapazität in Voll- und Gelegenheitslader kategorisiert. Im Anhang 7 wurden beide Ladekonzepte gegenübergestellt sowie für den Anwendungsfall bei der STOAG bewertet und gewichtet.

Im Folgenden werden die Ladekonzepte des Voll- und Gelegenheitsladers vorgestellt.

9.1.2.1 Volllader

Ist die Kapazität des Energiespeichers im Fahrzeug für einen ganzen Tageseinsatz ausgelegt, so handelt es sich um einen Voll- oder auch Übernachtslader (engl. Overnight Charger). Die Nachladung der im Vergleich zum Gelegenheitslader größeren Energiespeicher erfolgt an zentralen Punkten während der Betriebspause, vorzugsweise im Betriebshof. Bei zeitgleicher Ladung von mehreren Bussen an einem Ort ist eine entsprechende Anzahl von Ladepunkten vorzusehen. Die Auslegung der Ladepunkte ist abhängig von der Batteriekapazität, der maximalen Ladeleistung der Batterie und dem für die Ladung zur Verfügung stehenden Zeitfenster. Diese Parameter bestimmen das Betriebskonzept.

Während der mit moderater Leistung zeitlich ausgedehnten stationären Ladung kann der Ladezyklus optimiert werden. Diese Ladestrategie schont die Speicherzellen und kann sich unter anderem positiv auf die Lebensdauer von Akkumulatoren auswirken.

Um die Netzlast des Busbetriebshofs während der parallelen Nachladung einer Flotte von Vollladern zu minimieren, können über ein Lademanagementsystem (LMS) die Ladezyklen reguliert und über den kompletten verfügbaren Ladezeitraum verteilt werden. In Abhängigkeit von Akku-Kapazitäten und Fahrplan sollten die Akkumulatoren also möglichst zeitversetzt geladen werden.

Mit Blick auf die Energiewende im Stromsektor werden gerade Elektrofahrzeuge, wegen der möglichen netzdienlichen Nutzung ihrer großen Energiespeicher, von Politik, Wissenschaft und Energiewirtschaft als Chance für deren Umsetzung gesehen. Bei der Umstellung aller in Deutschland registrierten 80.000 Omnibusse auf Elektrobusse mit einer Speicherkapazität von je 400 kWh ergäbe sich ein theoretischer Gesamt-Energiespeicher von immerhin 32 GWh. Ob eine Teilnahme am Primärregelmarkt eine sinnvolle Option darstellt und eine zusätzliche Belastung der Batteriespeicher rechtfertigt, kann bisher nicht vollumfassend abgeschätzt werden.

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

Aufgrund der bislang noch begrenzten Reichweite ist es möglich, auch beim Volllader eine Zwischenladung während des Einsatztages zu realisieren, um die Tagesfahrleistung zu optimieren oder die Netzlast während der Nachtladung zu reduzieren. Hierfür ist auch der Begriff Depotlader üblich – in Abgrenzung zum Übernachtslader, welcher ausschließlich in den Nachtstunden und Zeiten der Betriebsruhe lädt. Eine solche Zwischenladung mit im Vergleich zur Gelegenheitsladung geringer Ladeleistung kann beispielsweise bei längeren Betriebspausen im Betriebshof oder an den Wendepunkten erfolgen. Auch ein Fahrzeugtausch ist für ein solches Szenario denkbar.

Die beim Volllader erforderliche hohe Kapazität des Energiespeichers verursacht ein hohes Gewicht und folglich ein hohes Fahrzeugleergewicht. Entsprechend reduziert sich die zur Verfügung stehende Platzkapazität. Dabei ist zu bedenken, dass Hersteller in der Regel vier Personen je Quadratmeter für die Berechnung der Stehplatzkapazität ansetzen, jedoch in der Realität die tatsächliche Belegung auch bei einem scheinbar vollen Bus deutlich niedriger liegt. Teilweise erfordert die Batterie des Vollladers einen größeren Einbauraum im Fahrzeug; bei den meisten Herstellern befinden sich die Traktionsbatterien jedoch auf dem Dach des Fahrzeugs.

Die Kosten für den Energiespeicher steigen nahezu linear mit der erforderlichen Speicherkapazität. Zum Einsatz kommen bei Vollladern generell die sogenannten Hochenergiebatterien. Sie sind für große Energiemengen und eine moderate Ladeleistung ausgelegt, um eine überproportionale Alterung zu vermeiden. Bezogen auf 1 kWh ist im Vergleich zu einer Hochleistungsbatterie die Hochenergiebatterie kostengünstiger.

Die zum Einsatz kommenden elektrochemischen Zusammensetzungen von Energiespeichern unterliegen einem stetigen Forschungs- und Entwicklungsprozess und somit fortwährenden Verbesserungen.

Bei entsprechender Dimensionierung der Fahrzeugbatterie kann ein Volllader viele der derzeit üblichen Betriebsszenarien von Dieselmussen gleichwertig abbilden. Abhängig vom Fahrprofil und der Fahrzeugkonfiguration können mit einer Ladung Reichweiten von 150 - 250 km erreicht werden.

9.1.2.2 Gelegenheitslader

Der Gelegenheitslader (engl. Opportunity Charger) verfügt über einen kleineren Energiespeicher, welcher nicht für einen kompletten Tageseinsatz

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

ausgelegt ist. Der Energiespeicher muss während des Linieneinsatzes auf der Strecke nachgeladen werden. Im Gegensatz zum Volllader mit Zwischenladung kommen beim Gelegenheitslader hohe Ladeleistungen und oft auch ein eigens hierfür vorgesehenes Ladesystem (z. B. Docking-Station) zur Anwendung.

Die Ladestrategie sieht entsprechend der Streckencharakteristik neben einer Nachladung auf dem Betriebshof weitere Ladepunkte an Wendepunkten vor. Zusätzlich können ausgewählte Haltestellen mit längerer Haltezeit als Ladepunkte mit hoher Nachladeleistung (Unterwegslader) ausgelegt werden. Der Batteriebus fährt einen Ladepunkt, der an einer Haltestelle eingerichtet ist, an. Sobald das Fahrzeug am Ladesystem positioniert ist, wird automatisch oder durch eine Aktion des Fahrpersonals die Kontaktherstellung ausgelöst und anschließend die Energieübertragung mit Leistungen bis derzeit etwa 450 kW gestartet. Generell beanspruchen hohe Ladeleistungen herkömmliche Akkumulatoren stärker, d. h. sie bewirken einen drastischen Leistungsabfall und wirken sich somit negativ auf die Lebensdauer des Energiespeichers aus.

Im Vergleich zum Overnight-Charging-Konzept, welches den Einsatz großer, kostenintensiver und schwerer Energiespeicher erfordert, kann durch das Zwischenladen während des Betriebseinsatzes der Energiespeicher kleiner ausgelegt werden. Dies wirkt sich in mehreren Aspekten positiv auf das Gesamtfahrzeug aus: Kleinere Energiespeicher haben ein geringeres Gewicht, nehmen weniger Bauraum in Anspruch und sind kostengünstiger in der Anschaffung. Für 1 kWh Batteriekapazität sind ca. 10 kg Batteriegewicht einschließlich Batteriemanagement anzusetzen.

Zum Einsatz kommen die sogenannten Hochleistungsbatterien, welche während der Nachladung innerhalb einer kurzen Zeitspanne eine hohe Energiemenge aufnehmen können, ohne dass der Energiespeicher dabei überproportional beansprucht wird. Dieser Typ des Energiespeichers ist daher besonders für den Einsatz in Hybrid- und Brennstoffzellenbussen bzw. Elektrobussen mit Gelegenheitsladung geeignet. Aufgrund höherer technischer Anforderungen ist der Durchschnittspreis je Kilowattstunde bis zu 50 % teurer als der einer Hochenergiebatterie, sodass nur geringere Speicherkapazitäten als beim Volllader wirtschaftlich sind.

Da nur vergleichbar geringe Speicherkapazitäten benötigt werden, kommen neben den elektrochemischen Batterien auch andere Speichertechnologien wie Kondensatoren bzw. genauer Ultrakondensatoren (Supercaps) in Betracht. Sie eignen sich für viele Lastzyklen und hohe Spitzenströme ohne

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

große Beanspruchung des Speichers, weisen aber geringere Energiedichten auf. Auf Grund des hohen Platzbedarfs sind Supercaps nur bedingt für den Einsatz in Elektrobussen geeignet. Gleiches gilt für kinetische Energiespeicher wie Schwungräder.

Im Ergebnis bieten die Gelegenheitslader ein höheres Platz- und Gewichtspotenzial für die Personenbeförderung sowie für den Verbau weiterer Aggregate.

Die Gelegenheitsladung erfordert gegebenenfalls Anpassungen der Betriebsabläufe bzw. der Umläufe, da zur Wahrung der Betriebssicherheit gewisse Ladezeiten sichergestellt werden müssen. Die Wendezeiten an Liniennendpunkten dienen häufig dem Verspätungsausgleich und müssen dementsprechend verlängert werden, um eine ausreichende Ladung und somit die Reichweite der Fahrzeuge zu ermöglichen.

Bei Sicherstellung der erforderlichen Ladezeiten und -häufigkeiten kann ein Gelegenheitslader quasi unbegrenzt im Einsatz bleiben. Auf entsprechend ausgestatteten und betriebenen Fahrwegen können somit Dieselbusse vollständig ersetzt werden.

Die Abhängigkeit der Gelegenheitslader von den vorgesehenen Zwischenladepunkten schränkt den flexiblen Einsatz der Gelegenheitslader im Liniennetz stark ein. Im Zuge betrieblicher Planungen, bspw. im Falle kurz- (wegen Baustellen) oder langfristiger (Umstellung des Liniennetzes) Umlaufanpassungen, sind die Ladepunkte als zusätzliche fixe Randbedingung in die Planung aufzunehmen.

Sobald einzelne Ladepunkte durch eine Vielzahl von Bussen genutzt werden, kann ein Investitionskostenvorteil erzielt werden.

9.2 Elektrische Energiezuführung

9.2.1 Überblick

Die stationären Ladeverfahren lassen sich in konduktive und induktive Verfahren unterteilen. Die konduktive elektrische Energiezuführung stellt das leitungsverbundene Laden über eine form- oder kraftschlüssige Verbindung dar. Der Begriff der induktiven elektrischen Energiezuführung bezeichnet das kontaktlose Laden unter Nutzung elektromagnetischer Felder, also ohne direkte Kontaktierung.

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

Unter der dynamischen konduktiven Ladung ist die leitungsgebundene Energieübertragung während der Fahrt zu verstehen. Das Energieübertragungssystem entspricht der Funktionsweise eines Oberleitungsbusses.

Es wird zwischen folgenden Ladesystemen unterschieden:

- ▶ Plug-In System
 - ▶▶ Fahrzeugseitiges Ladegerät
 - ▶▶ Stationäres, externes Ladegerät
- ▶ Docking-System
- ▶ Ladepunkt Oberleitung
- ▶ Oberleitung (dynamisch)
- ▶ Induktionsschleife / Pick-Up (induktiv)

Grundsätzlich werden Energiespeicher mit Gleichspannung nachgeladen. Wird der Ladestrom aus einer Wechselstrom-Quelle (engl. Alternating Current; AC) bezogen, ist dieser für das Laden der Speicher in Gleichstrom (engl. Direct Current; DC) zu wandeln. Eine Spezifizierung der Ladungsarten wird in den folgenden Abschnitten vorgenommen.

Folgende Faktoren beeinflussen Umfang und Dauer des Nachladens:

- ▶ Abstand zwischen den einzelnen Ladestationen
- ▶ Verweildauer an der Ladestation
- ▶ Höhe des Ladestroms
- ▶ Größe des Energiespeichers
- ▶ Entladungstiefe des Energiespeichers
- ▶ Alter des Energiespeichers
- ▶ Außentemperatur

Mit Hilfe des ermittelten Energie- und Leistungsbedarfs werden die notwendigen Energiespeichergrößen in den Bussen sowie die Ladeinfrastruktur überschlägig dimensioniert.

Folgende Kriterien werden zur Bewertung und Bestimmung des Ladesystems herangezogen:

- ▶ Technische Umsetzbarkeit
- ▶ Realisierbarkeit im vorgesehenen Projektzeitraum
- ▶ Energieeffizienz
- ▶ Kosten

Um eine Systementscheidung treffen zu können, sind die genannten Faktoren im Kontext mit den betrieblichen Anforderungen des jeweiligen Einsatzszenarios zu bewerten.

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

Die Entscheidung über die Nachladestrategie hat erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Systems in Verbindung mit der Attraktivität der Verkehrsdurchführung und der Einsatzstabilität.

Hinsichtlich der geplanten Elektrobusanwendung im Vorhaben der STOAG wird im Weiteren die konduktive Ladung, differenziert nach Docking-System und Plug-In-System, genauer analysiert. Das induktive Ladesystem wird nicht weiter betrachtet, da es bislang nur in Einzelanwendungen im Rahmen von Forschungsprojekten Anwendung fand und somit nicht als serienmäßiges Produkt auf dem Markt zur Verfügung steht.

Die Möglichkeiten der elektrischen Energiezuführung zum Nachladen von Bussen werden in nachfolgender Abbildung dargestellt.

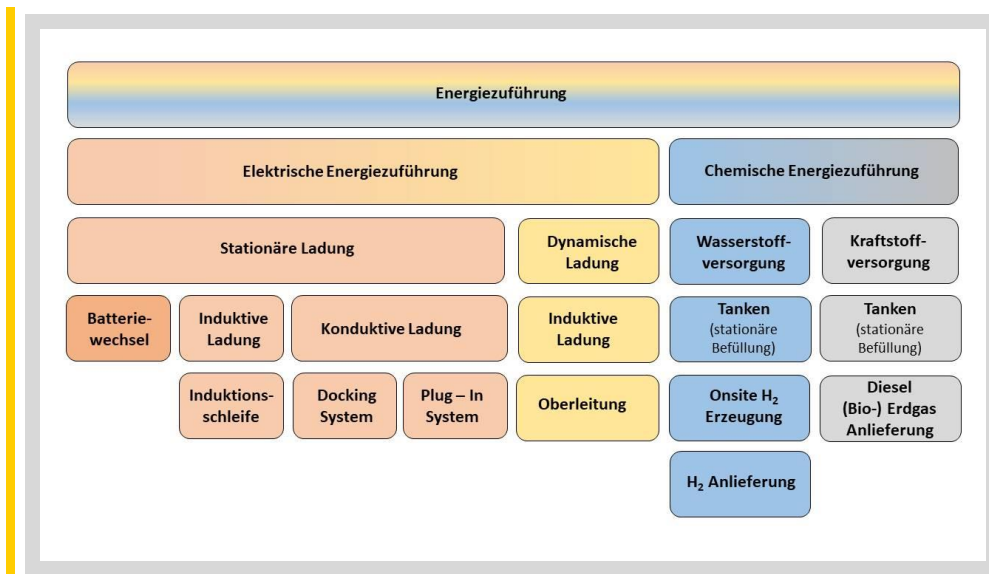


Abbildung 9.2: Möglichkeiten der Energiezuführung

9.2.2 Fahrzeugseitiges Ladegerät (Plug-In System)

Bei der Plug-In-Ladung (stationär, konduktiv) befindet sich das Ladegerät als Kopplung zwischen Netzanschluss und fahrzeugseitigem Energiespeicher im Fahrzeug. Über das Ladekabel wird ein infrastrukturunabhängiger Netzzugang gewährleistet.

Zum konduktiven Laden des Energiespeichers eines Elektrofahrzeuges wurden durch die International Electrotechnical Commission (IEC) in der Norm IEC 62196 die Lademodi AC/AC-Ladung (IEC 61851-1) inklusive der zugehörigen Steckverbinder definiert.

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

Fahrzeugseitig ist in Europa der von der Firma Mennekes entwickelte und (neben anderen Steckertypen) in der IEC 62196-2 standardisierte Typ-2-Stecker verbreitet. Dieser ist für die ein- und mehrphasige Ladung mit Wechselstrom bis 44 kW konzipiert.

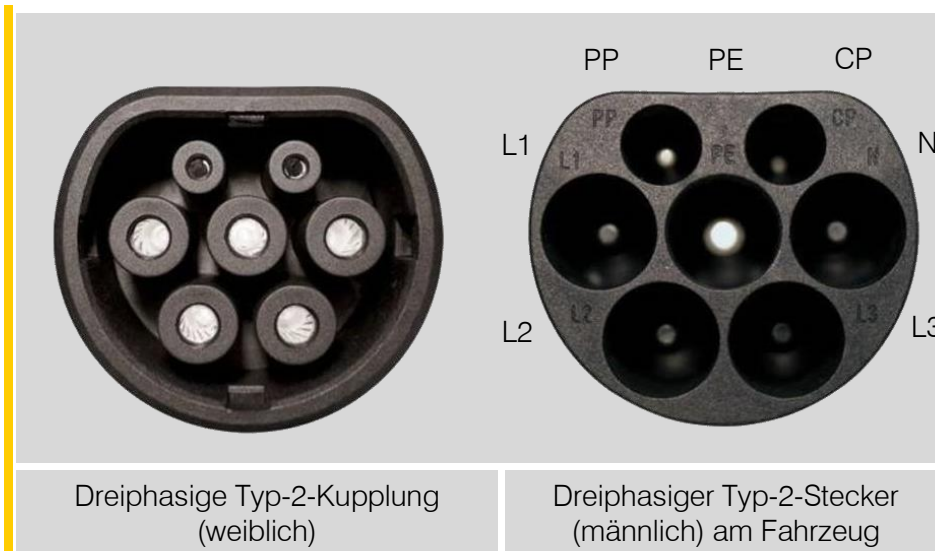


Abbildung 9.3: Belegung Typ-2-Kupplung und -Stecker nach IEC 62196¹⁰

9.2.2.1 Mode 1 (1~ AC)

Mode 1 beschreibt das Laden unter Nutzung einer konventionellen, einphasigen 230-V_{1AC}-Haushaltssteckdose (Schuko/CEE). Diese Anschlüsse sind im Allgemeinen mit 16 A abgesichert und stellen so eine maximale Ladeleistung von 3,7 kW zur Verfügung. Dieser Modus hat nach vorherrschender Meinung selbst für den PKW-Bereich nur einen eingeschränkten Nutzungsbereich, da zum einen die Ladezeiten sehr hoch und die Ladewirkungsgrade sehr niedrig (50 - 80 %) sind. Er ist bestenfalls für die Übernachtladung von Pkw geeignet. Im ÖPNV findet er keine Verwendung.

9.2.2.2 Mode 2 (1~ AC und 3~ AC)

Im Mode 2 unterteilt sich das Laden in das einphasige Laden an der Haushaltssteckdose mit 3,7 kW, wie in Mode 1, allerdings mit eigener Absicherung und Kommunikation (ICCB), und das 3-phasige Laden am CEE-Anschluss mit 32 A und 22 kW. Wie bei Mode 1 ist auch hier das

¹⁰ Bildquelle | <https://www.derladekabelshop.de/dostar-typ-2-m-auf-typ-2-w-32a-3-phasen-wunschlaen.html>

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

Ladegerät mobil im Fahrzeug verbaut. Die Verbindung erfolgt durch ein Ladekabel mit AC-Anschluss. Auch hier ist eine Verwendung im ÖPNV nicht vorgesehen.



Abbildung 9.4: Ladekabel AC-Ladung (Mode 2)¹¹

9.2.2.3 Mode 3 (3~ AC)

Mode-3-Laden beschreibt das Drehstromladen (dreiphasiger Wechselstrom) an Ladesäulen, bei denen Kommunikations- und Schutzmodule fest integriert sind. Es wird ein fahrzeugseitiges Ladegerät genutzt. Der Ladestrom ist in der Praxis auf 63 A begrenzt, es ergibt sich eine Ladeleistung von 44 kW. Ein einfaches Datensignal von der Ladetechnik zum Fahrzeug basierend auf Pulsweitenmodulation (PWM) überträgt den maximal zulässigen Ladestrom.



Abbildung 9.5: Ladekabel AC-Ladung (Mode 3)¹²

¹¹ Bildquelle | <http://www.emfm.de/ladestationen/ladekabel/>

¹² Bildquelle | <http://www.emfm.de/ladestationen/ladekabel/>

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

9.2.2.4 Bewertung

Die an ein Kabel gebundene konduktive Lademöglichkeit im Mode 1 bis 3 stellt technisch eine einfache Lösung dar. Sie ist hauptsächlich im Pkw-Bereich verbreitet, da dieser in der Regel deutlich geringere Batteriekapazitäten und Ladeleistungen erfordert.

Durch die Integration des Ladegeräts im Fahrzeug können die Infrastrukturkosten reduziert werden. Ein fahrzeugseitig vorgesehenes Ladegerät führt jedoch zur Erhöhung des Fahrzeugsgesamtgewichts. Zudem ist eine kompaktere Bauform notwendig und somit die Kühlung schwieriger als bei infrastrukturseitig verbauten Ladegeräten.

Durch das Ladegerät ist der Ladestrom auf 16 bis 63 A (5,5 bis 44 kW) begrenzt; dies führt zu einer sehr langen Ladedauer. Übliche Antriebsbatterien können wesentlich höhere Leistungen aufnehmen.

Das AC-Ladesystem ist für den Betrieb von Elektrobussen aufgrund geringer Ladeleistungen nicht zweckmäßig und wird daher nicht weiter betrachtet. Sofern ein Elektrobus über einen Anschluss an das 400 V_{AC}-Bordnetz verfügt, ist es möglich, diese Verbindung für Wartungs- und Instandhaltungszwecke zu nutzen.

9.2.3 Externes Ladegerät (Plug-In System)

Durch die International Electrotechnical Commission sind in der Norm IEC 62196 ebenfalls die Lademodi für AC/DC-Ladung inklusive der zugehörigen Steckverbinder definiert.

9.2.3.1 Mode 4 (DC)

Mode 4 definiert das Laden mit Gleichstrom. Dieser wird von stationär installierten Gleichrichtern in einer Ladestation bereitgestellt; ein Ladegerät im Fahrzeug ist nicht notwendig. Die genaue Ladespannung hängt von der zulässigen Spannung des zu ladenden Energiespeichers und den an die Ladestation übermittelten Zustandsdaten (z. B. Ladezustand SOC (State of Charge)) ab und liegt damit üblicherweise im Bereich von etwa 400 - 800 V_{DC}. Die erforderliche Ladeschlussspannung liegt höher als die Nennspannung der eingesetzten Batterien, sodass derzeit 850 V_{DC} als obere Grenze anzunehmen sind.

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

Es wird zwischen drei Ladevarianten unterschieden, wobei nur die DC-high-Ladung nach IEC 62196 standardisiert wurde:

- ▶ Die DC-low-Ladung erfolgt fahrzeugseitig über zwei Wechselstromkontakte einer Typ-2-Kabelverbindung. Die maximale Ladeleistung beträgt 38 kW_{DC}.
- ▶ Die DC-mid-Ladung erfolgt fahrzeugseitig über alle vier Wechselstromkontakte einer Typ-2-Kabelverbindung. Die maximale Ladeleistung beträgt etwa 120 kW_{DC} (in Europa von Tesla im Pkw-Bereich eingesetzt).
- ▶ Die DC-high-Ladung nutzt in Europa die Ladeschnittstelle Combo Typ 2 (auch kurz Combo 2), welche eine Erweiterung der üblichen Typ-2-Verbindung um zwei zusätzliche DC-Kontakte darstellt. Die maximale Ladespannung beträgt derzeit für den Combo-2-Stecker derzeit 850 V_{DC}, der maximale Ladestrom 200 A und die Maximalladeleistung dementsprechend 170 kW_{DC} (IEC 62196-3).

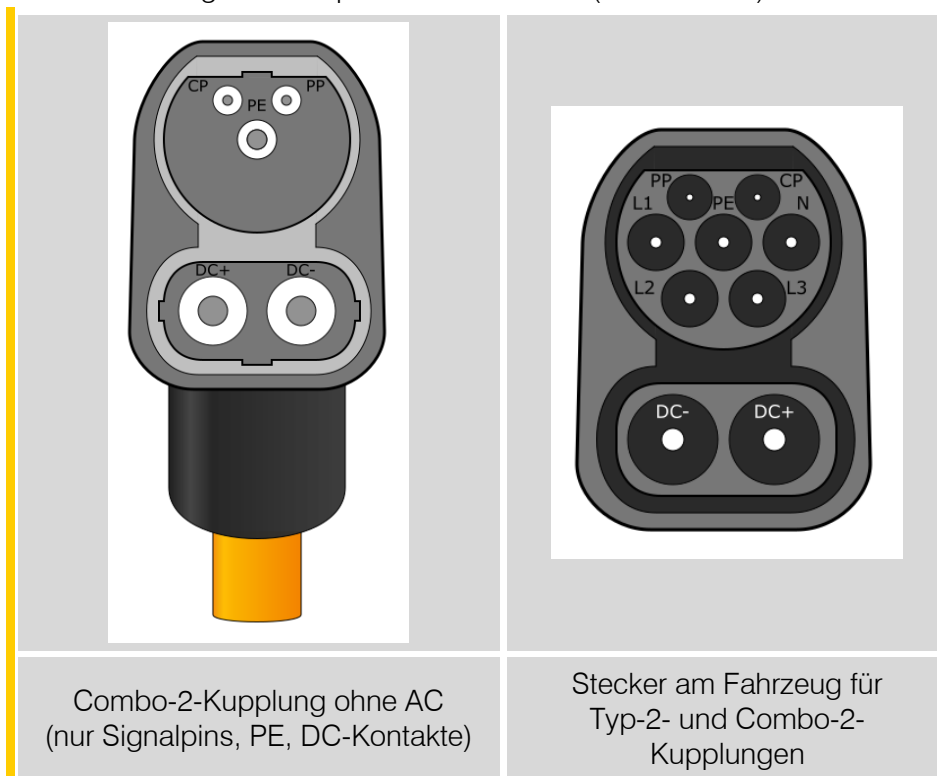


Abbildung 9.6: Belegung Combo-2-Kupplung und -Stecker nach IEC 62196¹³

¹³ Bildquelle | bearbeitet nach <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CCSCCombo2.svg>
Benutzer Ajzh2074

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

9.2.3.2 Proprietäre Systeme (DC)

Neben den standardisierten Systemen bieten Fahrzeughersteller auch eigene Ladesysteme an. Dies bedeutet in der Regel, dass Fahrzeuge eines Busherstellers auch nur über ein bestimmtes Ladesystem geladen werden können. Um eine möglichst große Interoperabilität zu erreichen und die Systeme unabhängig voneinander beschaffen zu können, wird für die Ladetechnik jedoch in jedem Fall auf herstellerunabhängige Standards gesetzt.

9.2.3.3 Bewertung

Das AC/DC-Ladesystem wird grundsätzlich für das Laden in der Betriebsruhe verwendet, d. h. für das Übernachten (Overnight Charging). Die Ladezeit wird durch die Ladeleistung und die Ladekapazität der einzelnen Batterien bestimmt.

Der Vorteil des stationären Ladegerätes im Betriebshof ist die überschaubare Nachladeinfrastruktur sowie der flexible Linieneinsatz der Fahrzeuge im Bedienegebiet.

Da sich beim Mode 4 (DC), im Gegensatz zum Mode 3 (AC), der notwendige Stromrichter nicht mehr im Fahrzeug, sondern in der Ladestation befindet, ist das Fahrzeuggewicht entsprechend geringer.

Die Investitionskosten für die AC/DC-Umrichter können gegebenenfalls anteilig auf mehrere Elektrobusse umgelegt werden, da ein Umrichter bei einer intelligenten Ladestrategie für das Nachladen mehrerer Fahrzeuge genutzt werden kann.

Die Gesamtladedauer des Ladeprozesses ist beim Laden über Plug-In-Systeme größer als bei Docking-Station-Systemen. Zudem verlangt das Laden die aktive Beteiligung des Fahrers (manuelles Einstecken des Ladekabels durch den Fahrer). Dies kann das Akzeptanzverhalten gegenüber dieser Technologie bzw. der Elektrobustechnologie im Allgemeinen negativ beeinflussen.

Das System ist flexibel einsetzbar und kann auch als Rückfallebene für andere Ladesysteme, z. B. das Docking-Station-System dienen.

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

9.2.4 Docking-Station**9.2.4.1 Definition**

Stationäre, konduktive Energiezuführungssysteme dienen ausschließlich dem Laden der Energiespeicher im Fahrzeugstillstand. Es können große Leistungen zwischen wegseitiger Ladeeinrichtung und fahrzeugseitigem Energiespeichersystem übertragen werden.

Über das Docking-Station-System wird der fahrzeugseitige Energiespeicher an punktuell im Linienverlauf installierten Ladestationen nachgeladen. Das Nachladen erfolgt auf der Strecke während planmäßiger Fahrzeugstopps an Wendepunkten und/oder Zwischenhaltstellen. Bei dieser Form der Energieübertragung spricht man von Gelegenheitsladung (Opportunity Charging).

Das Spannungs- und Leistungsniveau ist nicht vorgegeben und richtet sich nach dem jeweiligen Anwendungsfall. Im Allgemeinen liegen die Spannungsparameter im Bereich von 400 - 850 V_{DC}, wobei auf Seiten der Ladetechnik teilweise Ausgangsspannungen von 150 - 920 V_{DC} und Ladeleistungen von 150 - 600 kW_{DC} unterstützt werden.

Die Ladung erfolgt ebenfalls nach Mode 4 IEC 61851-1. Kommunikation und Ladegeräte sind also vergleichbar mit der Steckerladung über Combo 2 (IEC 62196 basiert auf IEC 61851-1).

Je nach Kopplungsrichtung wird zwischen folgenden Ausführungsvarianten unterschieden:

- ▶ Hub-Docking-Station: Stromabnehmer zur Kontaktherstellung auf dem Fahrzeugdach (Engl. on-board bottom-up pantograph), Hub bis 1,2 m
- ▶ Senk-Docking-Station: Stromabnehmer zur Kontaktherstellung an der Ladestation (Engl. off-board top-down pantograph), Hub bis 2,5 m

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems



Hub-Docking-Station
im Projekt SEB Dresden

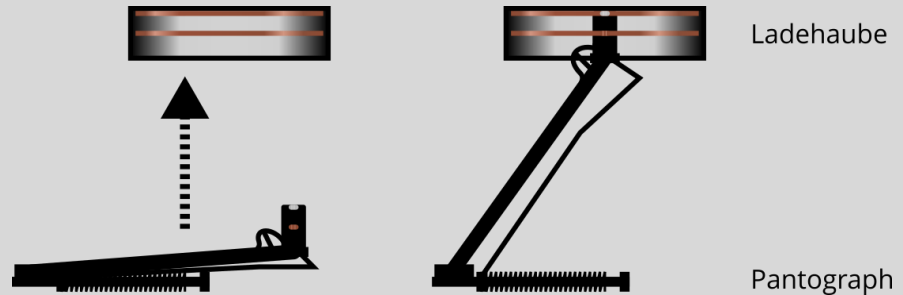


Abbildung 9.7: Hub-Docking-Station



Senk-Docking-Station
im Projekt Hamburg

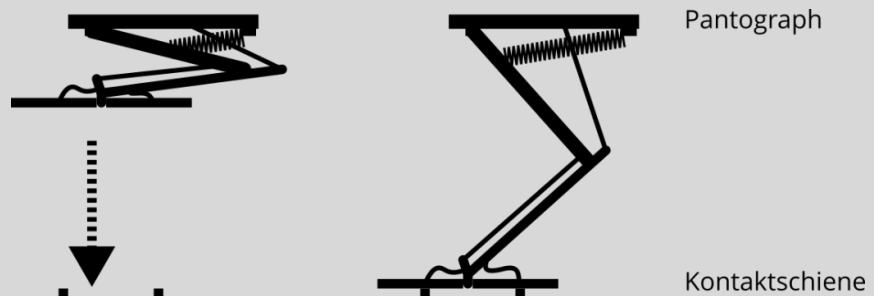


Abbildung 9.8: Senk-Docking-Station

Die Ladung per Docking-Station erfolgt mit einer hohen Leistungsübertragung. Aufgrund der großen Anschlussleistung kann das übergeordnete Energienetz unzulässig hoch belastet werden, sodass in diesem Fall ein zusätzlicher Zwischenspeicher am Ladestandort erforderlich wäre.

Docking-Systeme sind mit einer Sicherheitsfunktion ausgerüstet. Durch die Verwendung von mindestens vier Kontakten – Schutzleiter PE, Plus DC+, Minus DC-, Pilotkontakt CP – mit gesicherter Einhaltung der Kontaktreihenfolge sind Gefährdungen ausgeschlossen. Der Pilotkontakt CP erkennt die ordnungsgemäße Kontaktherstellung und fordert die Nachladung an. Über den Schutzleiter PE erfolgen im Fehlerfall die Schutzterdung der Anlage und die automatische Abschaltung der Energieversorgung.

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

9.2.4.2 Bewertung

Das Docking-Station-System ist in erster Linie durch die Fähigkeit gekennzeichnet, einen Ladevorgang mit hoher Ladeleistung vollautomatisch und in kürzester Zeit durchzuführen.

Folgende Vorteile bietet der Einsatz von Docking-Station-Systemen:

- ▶ Durch planbare Zwischenladungen an den Nachladepunkten können die notwendige Batteriekapazität und damit die Fahrzeugkosten deutlich verringert werden.
- ▶ Die Autonomie der Fahrzeuge wird nur in geringem Umfang beschränkt.
- ▶ Ein sicherer Betrieb ist gewährleistet. Gefährdungen für Mensch und Material können bei der Energieübertragung ausgeschlossen werden. Es sind keine Einschränkungen bei der Fahrgastbeförderung zu erwarten.
- ▶ Zusätzliches Personal oder besondere Kenntnisse in der Bedienung sind nicht nötig.
- ▶ Mögliche Abweichungen in der Halteposition des Busses und Fahrzeugabsenkungen (engl. Kneeling) können teilweise durch die Docking-Station ausgeglichen werden.
- ▶ Das System ist gegenüber jahreszeitlich bedingten Witterungsbedingungen robust und daher ganzjährig, ohne weitere Vorkehrungsmaßnahmen, einsetzbar.

Jedoch sind folgende einschränkende Aspekte zu berücksichtigen:

- ▶ Die Ladung auf der Strecke führt zu einem Ladeinfrastrukturbedarf außerhalb des Betriebshofes und somit zu erhöhten Investitionskosten für die dezentralen Ladestationen, insbesondere an Linienendpunkten im Stadtgebiet bzw. außerhalb der Stadt.
- ▶ Die Anzahl der vorzusehenden Ladestationen hängt im Wesentlichen von der jeweiligen Liniencharakteristik sowie den betrieblichen und verkehrsplanerischen Vorgaben des Verkehrsunternehmens ab.
- ▶ Die infrastrukturelle Bindung der Fahrzeuge an die Ladestandorte führt zu einer stärkeren Linienbindung und somit zu einer geringeren Flexibilität des Elektrobuseinsatzes im Liniennetz.

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

9.3 Leistungsverteilung auf dem Betriebshof

9.3.1 Überblick

Selbst bei kleineren Flotten kann der Leistungsbedarf die Leistungsreserve oder Leistungsfähigkeit des vorhandenen Transformators, der für die Versorgung des Betriebshofes und/oder eines Verwaltungsgebäudes zuständig ist, übersteigen. Deshalb ist für die Ladung der Batteriebusse neben den Ladegeräten ein Verteilungsnetz aufzubauen, das eine zuverlässige und leistungsfähige Ladung ermöglichen kann.

Die Leistung und Energie werden im Allgemeinen über ein Versorgungsnetz bezogen. Das Versorgungsnetz wird vom Versorgungsnetzbetreiber (VNB) unterhalten. Dieser gibt die technischen Bedingungen zum Anschluss an das Versorgungsnetz vor. Handelt es sich um ein Mittelspannungsnetz sind die „Technischen Anschlussbedingungen für den Anschluss an das Mittelspannungsnetz“ zu beachten. Dieses Dokument wird vom BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. herausgegeben und liegt in der aktuellen Fassung von 2008 vor (BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2008).

Aufgrund des hohen Leistungsbedarfs ist ein Anschluss an das Mittelspannungsnetz (10/20/30 kV) oder in besonderen Fällen an das Hochspannungsnetz (110 kV) vorzunehmen. Zur Trennung zwischen Versorgungsnetz und Kundennetz (Busbetriebshof) ist eine Übergabestation zu errichten. Dort sind zu Mess- und Abrechnungszwecken Geräte zu installieren. Im Bedarfsfall kann die Verbindung zum Versorgungsnetz getrennt werden.

Über das betriebshofinterne Verteilnetz werden die Leistung und Energie in Richtung der Ladegeräte weiterverteilt. Es bietet sich an, dass das Verteilnetz dieselbe Spannung wie das Versorgungsnetz hat. So ist die Übergabestation mit einer Schaltanlage für die entsprechende Spannung auszustatten. Das Verteilnetz kann nach verschiedenen Konzepten aufgebaut werden. Es ist zwischen der Einrichtung eines Stich- oder Ringnetzes abzuwägen. Innerhalb des Verteilnetzes sind Transformatoren einzubinden, die die Mittelspannung in Niederspannung wandeln. Aus dieser Niederspannung, allgemein 400 V_{3AC}, im Besonderen je nach Bedingung abweichend, werden die Ladegeräte gespeist. Die Ladegeräte wirken als Gleichrichter, die ausgangsseitig Strom und Spannung stellen können.

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

Über die Ladegeräte werden die Batteriebusse mit Kabel oder Pantograph geladen.

9.3.2 Übergabestation

Die Übergabestation dient zunächst als Anschlussstelle an das Versorgungsnetz. Der Anschluss erfolgt i. d. R. über das Mittelspannungsnetz, sodass eine Mittelspannungsanlage den Hauptbestandteil der Übergabestation bildet. Die Schaltanlage sollte als zugelassene, standardisierte, fabrikfertige Anlage ausgeführt werden. Im Entwurf der Schaltanlage sind Parameter wie Redundanz und Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen. Die Anlage sollte in der Lage sein, für eine zuverlässige Ladung der Batteriebusse zu sorgen.

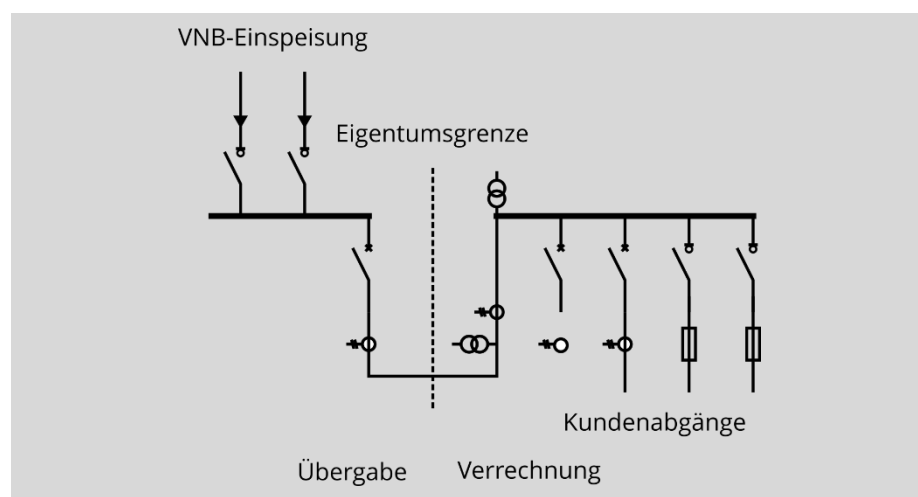


Abbildung 9.9: Konzeption Übergabestation, ohne Redundanz nach (Siemens AG, 2018)

Abbildung 9.9 zeigt eine einfache Möglichkeit, eine Übergabestation zu konzipieren. Die Übergabestation wird in einen Mittelspannungsring des VNB eingeschleift. Über das Übergabefeld kann das Versorgungsnetz vom Kunden getrennt werden. Über Messwandler wird die Verrechnung durchgeführt. Die sogenannten Felder für die Kundenabgänge sind auf einer Sammelschiene aufgelegt. Die Sammelschiene ist einfach ausgeführt. Liegt ein Fehlerfall in der Verrechnungszelle oder auf der Sammelschiene an, so führt dieser zum Ausfall der gesamten Übergabestation. Eine Redundanz ist somit nicht gegeben. In Anbetracht der Wirtschaftlichkeit bietet dieser Entwurf Vorteile, da wenige Bauteile benötigt werden und somit auch wenig Platz benötigt wird. (Siemens AG, 2018)

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

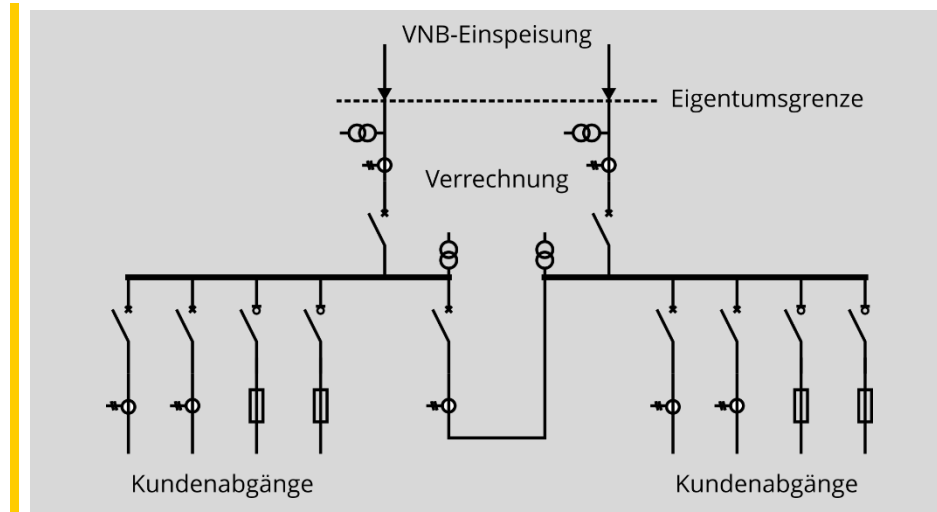


Abbildung 9.10: Konzeption Übergabestation, mit redundanter Einspeisung nach (Siemens AG, 2018)

In Abbildung 9.10 ergibt sich die Redundanz durch die getrennte Einspeisung auf zwei Sammelschienen. Tritt ein Fehler auf einer Sammelschiene auf, so kann die andere Sammelschiene weiter betrieben werden. Sind die nachgelagerten Transformatoren im Stich angeschlossen, so ist ein Weiterbetreiben bei gestörtem Sammelschienenabschnitt nicht möglich. Bei Verwenden eines Rings ist die Speisung aller angeschlossenen Transformatoren über den nicht gestörten Sammelschienenabschnitt möglich. Beide Sammelschienen sind über eine Kupplung verbunden. Die Einschleifung des VNB-Rings erfolgt über die Übergabestation. Die Trennung der Sammelschiene ist aufwändiger und erfordert bei räumlicher Trennung beider Sammelschienenabschnitte einen höheren Flächenbedarf. (Siemens AG, 2018)

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

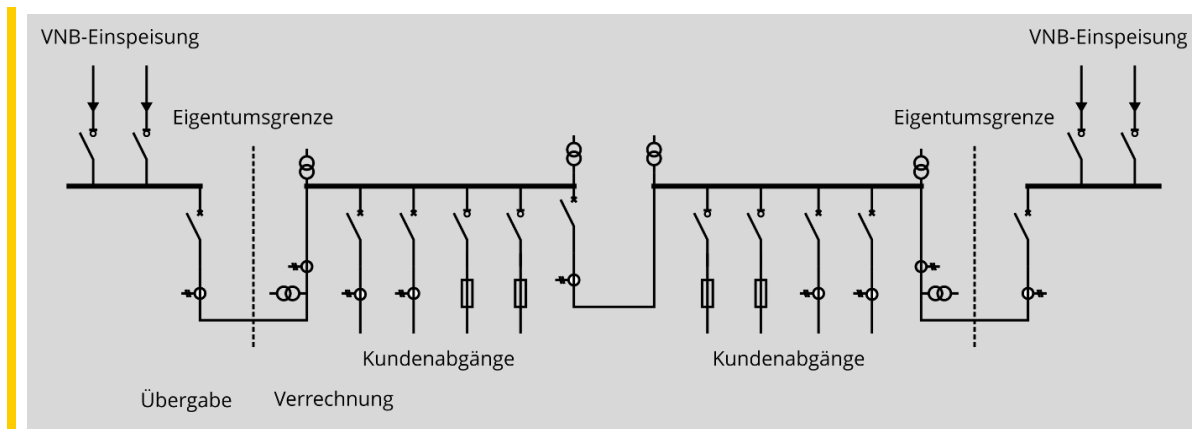


Abbildung 9.11: Konzeption Übergabestation, mit redundanter Einspeisung und getrennten Verrechnungsmessfelder nach (Siemens AG, 2018)

In Abbildung 9.11 ist im Vergleich zur Abbildung 9.10 die Verrechnung getrennt. Die Einspeisung erfolgt über zwei verschiedene VNB-Ringe, was die Versorgungssicherheit weiter erhöht. Die Ringe werden nicht über die Kundenanlage geschlossen. Technisch stellt diese Variante die Aufwändigste dar. Es ist somit davon auszugehen, dass für diese Variante höhere Kosten entstehen. (Siemens AG, 2018)

9.3.3 Betriebshofverteilnetz

9.3.3.1 Stich

Eine Möglichkeit das MS-Netz auf dem Betriebshof zu gestalten, ist die Möglichkeit, dieses stichförmig auszuführen. Werden die Transformatoren im Stich angeschlossen, so ist für jeden Stich ein Feld für den Schalter in der Übergabestation, in der Abbildung 9.12 als Mittelspannungshauptverteilung (MSHV) gekennzeichnet, vorzusehen. Bei vielen angeschlossenen Transformatoren steigt die Anzahl der benötigten Felder. Der Transformator kann ohne eine weitere Schaltanlage angeschlossen werden. Eine Redundanz ergibt sich durch den Anschluss im Stich nicht. Im Falle eines Kabelfehlers oder eines Fehlers im Abgangsfeld fällt der Transformator aus. Der Schutz wird durch das Schaltgerät in der Übergabestation realisiert. (Siemens AG, 2018)

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

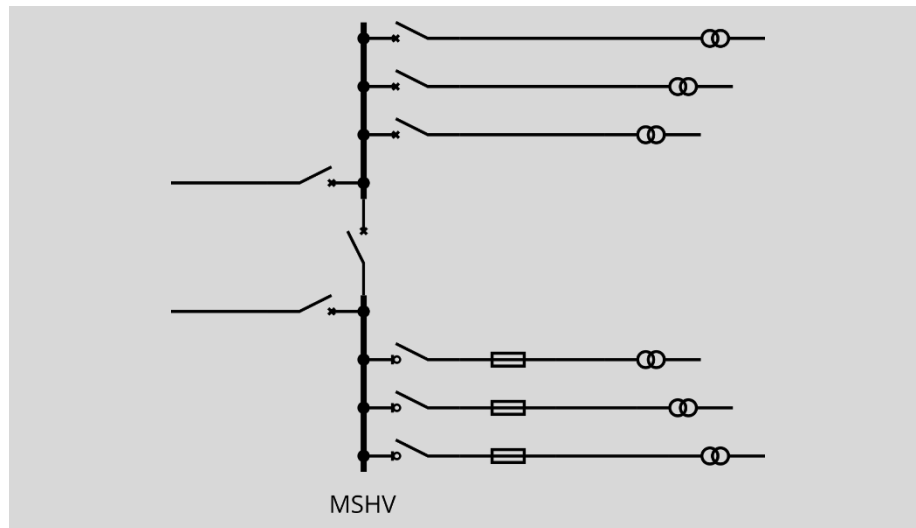


Abbildung 9.12: Mittelspannungsnetzform Stich nach (Siemens AG, 2018)

9.3.3.2 Ring

Ein Mittelspannungsring belegt zwei Felder in der Übergabestation, sodass der Ring von zwei Seiten gespeist werden kann. Die Transformatoren werden über Unterstationen, in Abbildung 9.13 Netzstation genannt, angeschlossen. Diese enthält eine Schaltanlage zum Einschleifen des Rings sowie einen Abgang für den Transformator. In einem Ring können mehrere Netzstationen eingebunden werden. Der Ring kann als „offener Ring“ oder „geschlossener Ring“ betrieben werden.

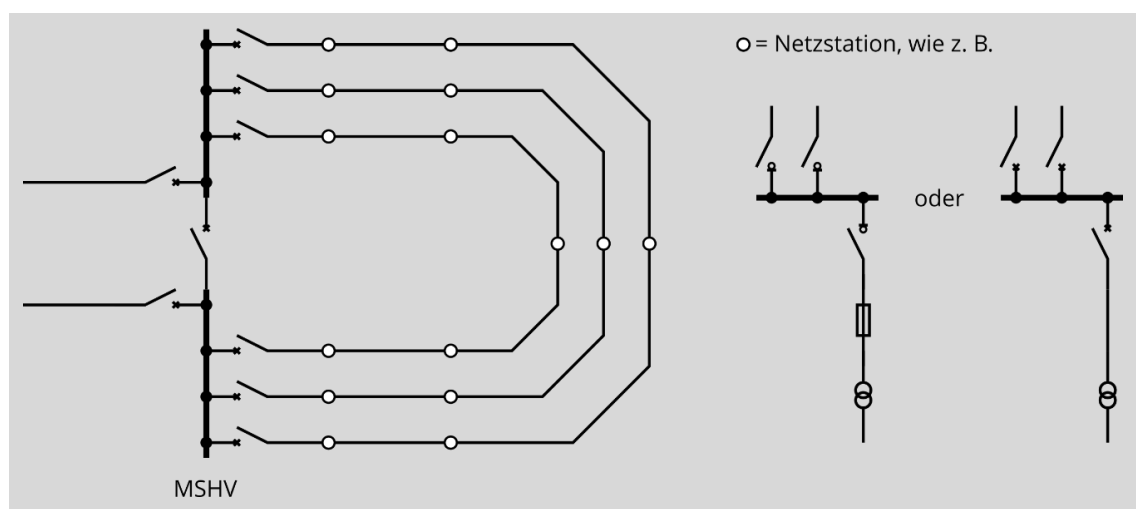


Abbildung 9.13: Mittelspannungsnetzform Ring nach (Siemens AG, 2018)

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

Bei der Betriebsweise „offener Ring“ ist der Ring an einer Stelle an einer Netzstation geöffnet, sodass die Netzstationen von jeweils einem Abgangsfeld der Übergabestation gespeist werden. Der Schutz erfolgt über die Schaltfelder in der Übergabestation und kann so als relativ einfach bezeichnet werden. Tritt ein Fehler auf, so löst das entsprechende Schutzgerät in der Übergabestation aus und schaltet den fehlerhaften Abschnitt, aber auch die fehlerfreien Abschnitte bis zu der Stelle aus, an der der Ring geöffnet ist. Durch Kurzschlussanzeiger kann der fehlerhafte Abschnitt geortet werden. Der fehlerhafte Abschnitt kann daraufhin herausgeschaltet werden. Der Ring wird dann an der vorher geöffneten Stelle geschlossen, sodass alle fehlerfreien Transformatoren weiter betrieben werden können. Durch die Schaltvorgänge verringert sich die Verfügbarkeit der Anlage. (Siemens AG, 2018)

Um die Verfügbarkeit zu verbessern, kann der Ring als „geschlossener Ring“ betrieben werden. Dafür sind an jeder Netzstation Schutzgeräte zu installieren, die auf die anderen Schutzgeräte abgestimmt sind. Dadurch wird eine Selektivität erreicht, die einen Weiterbetrieb der fehlerfreien Netzstationen ermöglicht. Für diese Option sind Leistungsschalter in den Schaltanlagen zu verwenden; diese können aus der Ferne ein- und ausgeschaltet werden. (Siemens AG, 2018)

9.3.4 Transformatorstation und Integration der Ladegeräte

Werden die Transformatoren über Stiche oder Ringe angeschlossen und somit ein Verteilnetz auf dem Betriebshof aufgebaut, so sind die Transformatoren dezentral auf dem Betriebshof verteilt. Dies scheint bei größeren Betriebshöfen sinnvoll. Bei kleineren Abstellanlagen ist es auch denkbar, die Transformatoren zentral aufzustellen. Es kann also zwischen einer zentralen oder dezentralen Aufstellung der Transformatoren unterschieden werden.

Diese Unterscheidung zwischen zentraler und dezentraler Aufstellung gilt ebenso für Ladegeräte. Bei zentraler Aufstellung sind die Ladegeräte in räumlicher Nähe zum Transformator installiert. Die Strecke zwischen Ladegerät und Batteriebus wird mit einem längeren DC-Kabel überwunden. Am Aufstellplatz des Busses ist eine Ladesäule aufgestellt, die einen oder zwei Ladepunkte (links und/oder rechts) bedient. Die Ladesäule dient zum Aufhängen der Ladekabel, während diese nicht genutzt werden, zur Anzeige der Betriebsbereitschaft und evtl. zur Verstärkung der Kommunikationsleitung. Ein Beispiel für die zentrale Aufstellung der Ladegeräte bei dezentraler Aufstellung der Transformatoren zeigt Abbildung 9.14.

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

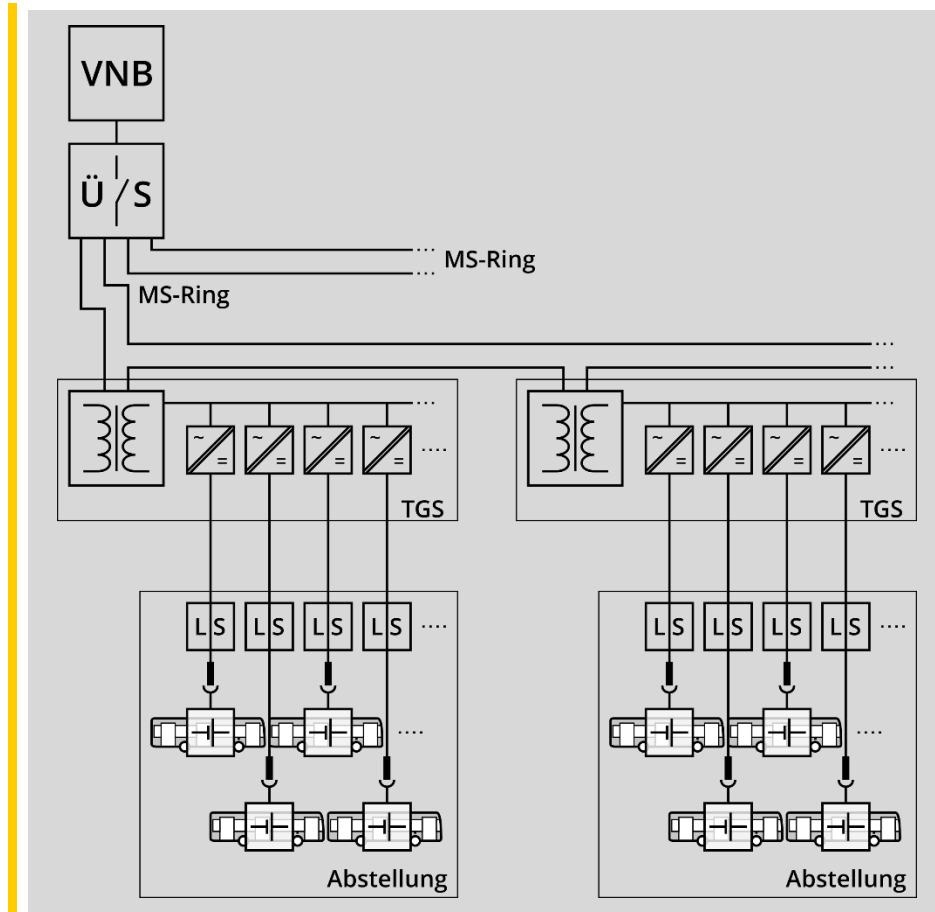


Abbildung 9.14: Ladeinfrastruktur, dezentrale Transformatorstationen und zentrale Ladegeräte (eigene Darstellung)

Die Leistung wird vom Versorgungsnetzbetreiber bezogen und über die Übergabestation (ÜS) auf das betriebshofinterne Verteilnetz (hier Mittelspannungsringe) verteilt. An die Mittelspannungsringe (MS-Ringe) sind dezentral mehrere Transformatorstationen angeschlossen. Innerhalb dieser Stationen sind die Ladegeräte aufgestellt. Zusammen bilden sie eine Transformator- und Gleichrichterstation (TGS). Über DC-Kabel werden die Ladesäulen (LS) angeschlossen. Über ein Kontaktsystem, beispielsweise über ein Ladekabel, wird die Leistung auf den Batteriebus übertragen.

Anstelle einer zentralen Aufstellung der Ladegeräte mit einiger Entfernung zum Ladepunkt, können die Ladegeräte dezentral direkt am Ladepunkt aufgestellt werden. Sie ersetzen die sonst notwendige Ladesäule. Ein dezentrales Ladepunktladegerät wird über ein längeres 3AC-Niederspannungskabel angeschlossen. Bei größeren Strecken und hohen

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

Leistungen kann das zu relativ hohen Verlusten führen. Die Verluste lassen sich begrenzt durch einen größeren Kabelquerschnitt kompensieren. Es sei jedoch angemerkt, dass durch den quadratischen Einfluss der Stromstärke auf die Verlustleistung¹⁴, der Stromstärke eine größere Gewichtung zukommt. Zudem bedeutet ein größerer Kabelquerschnitt einen Materialmehraufwand, der mit höheren Kosten verbunden ist. Die Stromstärke kann bei gleicher Leistung durch eine höhere Spannung verringert werden. In Abbildung 9.15 ist die dezentrale Aufstellung der Ladegeräte bei zentraler Aufstellung der Transformatoren dargestellt.

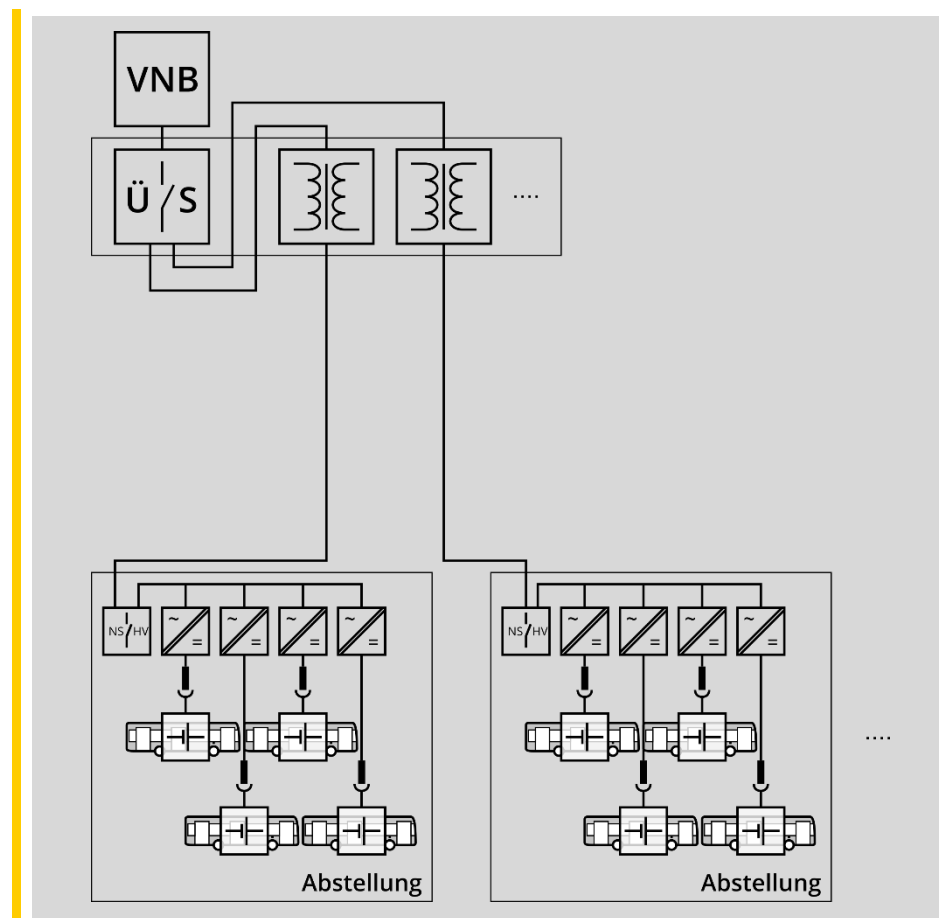


Abbildung 9.15: Ladeinfrastruktur, zentrale Transformatorstation und dezentrale Ladegeräte (eigene Darstellung)

Die vom VNB bezogene Leistung wird von der Übergabestation (ÜS) auf die Transformatoren verteilt. Die Transformatoren sind in der Nähe, hier

¹⁴ Hinweis | Die Verlustleistung P_V berechnet sich als $P_V = I^2 \cdot R$

Technologiebetrachtung des Elektrobussystems

beispielsweise im selben Gebäude, aufgestellt. Über 3-AC-Niederspannungskabel wird die Leistung zur Abstellung geführt. Eine weitere Verteilung wird über die Niederspannungshauptverteilung (NSHV) gewährleistet. Die Ladegeräte stehen direkt am Ladepunkt. Das DC-Kabel dient in diesem Fall lediglich als Ladekabel.

Auf Basis der dargelegten Varianten können je nach Anwendungsfall weitere Kombinationen, wie bspw. die dezentrale Aufstellung der Transformatoren sowie der Ladegeräte oder auch die zentrale Aufstellung von Transformatoren und Ladegeräten, betrachtet werden. kann. Im Falle der anwendungsoptimierten Betrachtung erfolgt der Abwägungsprozess unter Berücksichtigung der Wirkungsgradkette und der flächenoptimalen Aufstellung.

10 Umsetzungsempfehlung

Die Ausweitung des Elektrobusbetriebs in Oberhausen erfolgt schrittweise, wobei folgende Faktoren maßgebend den Umsetzungsprozess bestimmen:

- ▶ Neu-/ Wiederbeschaffungszyklen für Fahrzeuge
- ▶ Beschlüsse der Entscheidungsträger
- ▶ Fortschreitende technologische Entwicklung
- ▶ Preisentwicklungsszenarien für Technologien und Energieträger
- ▶ Bereitstellung öffentlicher Fördermittel.

Das Umsetzungskonzept basiert grundlegend auf den Ergebnissen der Machbarkeitsstudie, die als Entscheidungsgrundlage für die schrittweise Systemumstellung herangezogen werden.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde ermittelt, dass ein, der Zielstellung entsprechender, ausschließlicher Vollader-Einsatz unter den bestehenden betrieblichen Bedingungen nicht abbildbar ist. Das Umsetzungskonzept sieht einen Mischbetrieb von Voll- und Gelegenheitsladern vor. Zudem sind betriebliche Anpassungen, wie die Anpassung der Platzkapazität bei Solo- und Gelenkbus sowie die Verkürzung von ausgewählten Umläufen zur Abbildung des Vollladereinsatzes auf den entsprechenden Linien vorgesehen. Die Teilung der Umläufe führt zu einem erhöhten Fahrzeugmehrbedarf.

Zur Erhöhung der betrieblichen Flexibilität im Fahrzeugeinsatz, sieht das Fahrzeugkonzept eine einheitliche Konfiguration der Elektrobusse vor. Sowohl Vollader als auch der Gelegenheitslader verfügen über die gleiche Speicherkonfiguration (Speicherauslegung, Speicherart) und über das gleiche Lade- und Kontaktierungssystem.

Der Solo-Elektrobus verfügt über 70 Plätze und einen Batteriespeicher (Hochenergiebatterie¹⁵) von 409 kWh (brutto) / 327 kWh (netto). Der Gelenk-Elektrobus verfügt über 100 Plätze und einen Speicher von 466 kWh (brutto) / 373 kWh (netto). Als Heizungssystem findet die Wärmepumpe Anwendung.

Der Umsetzungsplan sieht folgende drei Umsetzungsstufen vor:

¹⁵ Hinweis | Eine Hochleistungsbatterie ist bei höheren Ladeleistungen > 300 kW erforderlich.

Umsetzungsempfehlung

- ▶ Stufe 1: 15 Solo-Elektrobusse, Gelegenheitslader
- ▶ Stufe 2: 72 Solo-Elektrobusse, Voll- und Gelegenheitslader
- ▶ Gesamtumstellung: 72 Solo-Elektrobusse und 61 Gelenk-Elektrobusse, Voll- und Gelegenheitslader

In der **1. Umsetzungsstufe** ist die Einführung von 15 Solo-Elektrobussen, in der Ausführung als Gelegenheitslader, bis zum Jahr 2021 vorgesehen. Der Einsatz erfolgt auf den Linien SB97/952, 953/961, 955 und 956. Die Ladung wird voraussichtlich an den Endpunkten Wehrstraße (WEH, 2 Ladepunkte) und Anne-Frank-Realschule (AFR, 2 Ladepunkte) durchgeführt. Es wurden Fördermittel zur Co-Finanzierung des Vorhabens beim Land und Bund beantragt.

Bis zum Jahr 2029 soll im Zuge der **2. Umsetzungsstufe** die Umstellung aller Solobusse auf Elektrobusbetrieb erfolgen. Es ist sowohl der Einsatz von Vollladern, mit ausschließlicher Nachladung im Betriebshof, als auch von Gelegenheitsladern, mit Nachladung an geeigneten Linienendpunkten vorgesehen. Neben dem in der ersten Umsetzungsstufe ausgebauten Endpunkt Wehrstraße sind am Endpunkt Anne-Frank-Realschule 2 weitere Ladepunkte (4 Ladepunkte) sowie zusätzlich an den Endpunkten Falkestraße (FAL, 2 Ladepunkte), Sterkrade Bahnhof (OSB, 2 Ladepunkte) und Fröbelplatz (FRÖ, 1 Ladepunkt) Ladeinfrastruktur vorzusehen. Zur Sicherstellung des Elektrobusbetriebs ist ein zusätzlicher Fahrzeugbedarf von 4 Solo-Elektrobussen erforderlich, so dass sich die Solobusflotte von derzeit 68 auf 72 Fahrzeugen erhöht.

Die **Gesamtumstellung** sieht einen Mischbetrieb von Voll- und Gelegenheitsladern vor. Neben der Ladeinfrastruktur, die bereits im Zuge der zweiten Umsetzungsstufe an den Endpunkten Wehrstraße, Anne-Frank-Realschule, Falkestraße, Sterkrade Bahnhof und Fröbelplatz errichtet wurde, sind zusätzlich die Endpunkte Holten Bahnhof (HOB, 1 Ladepunkt) und Fröbelplatz (FRÖ, 3 weitere Ladepunkte) mit Ladeinfrastruktur auszurüsten. Der Elektrobusbetrieb erfordert einen Fahrzeugmehrbedarf von insgesamt 13 Fahrzeugen, so dass sich die Gesamtflotte von 120 auf 133 Fahrzeuge, davon 72 Solo-Elektrobusse (68 + 4) und 61 Gelenk-Elektrobusse (52 + 9) erhöht.

Zur Festlegung der folgenden Umsetzungsschritte bis hin zur Gesamtumstellung ist der Umsetzungsplan entsprechend des Projektfortschritts und der zum Zeitpunkt X aktuell bestehenden technischen, betrieblichen, wirtschaftlichen und ökologischen Anforderungen und Rahmenbindungen sukzessive fortzuschreiben.

Umsetzungsempfehlung

Eine fortlaufende Aktualisierung und Fortschreibung der Umsetzungsschritte kann entsprechend folgender Tabelle, in welcher die wesentlichen Umsetzungsstufen und Kenndaten des **Umsetzungsplans** zusammengefasst wurden, erfolgen.

Stufe	Zeitpunkt	Fahrzeuge kumul.	Fahrzeugart	Linien-einsatz	Lade-konzept	Ladeort	Lade-System	Stand
1	2021	15 EB	15 SB	SB97/952, 953/961, 955, 956	GL	WEH (2 LP) AFR (2 LP)	Docking	06/2020
2	2029	72 EB	72 SB	SB97/952, 953/961, 955, 956 ...	VL, GL	WEH (2 LP) AFR (4 LP) FAL (2 LP) OSB (2 LP) FRÖ (1 LP) ...	Docking	06/2020
Fortschreibung								
Ziel: Gesamt	...	133 EB	72 SB	SB97/952, 953/961, 955, 956 ...	VL, GL	WEH (2 LP) AFR (4 LP) FAL (2 LP) OSB (2 LP) FRÖ (4 LP) HOB (1 LP) ...	Docking	06/2020
			61 GB	...	VL, GL	...	Docking	06/2020

EB – Elektrobus, SB – Solobus, GB – Gelenkbus, VL – Volllader, GL – Gelegenheitslader, WEH – Wehrstraße, AFR – Anne-Frank-Realschule, FAL – Falkestraße, OSB – Sterkrade Bahnhof, FRÖ – Fröbelplatz, HOB – Holten Bahnhof, Docking – Docking-Station-System

Tabelle 10.1: Umsetzungsplan, 06/2020

Festlegungen der STOAG nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie:

Im Zuge der Erarbeitung der Machbarkeitsstudie wurde der Endpunkt Anne-Frank-Realschule als geeigneter Ladestandort ermittelt und zur Nachladung der Linien SB97/952 und 955 herangezogen. Durch die STOAG wurde nach Redaktionsschluss der Machbarkeitsstudie beschlossen, dass der Endpunkt

Umsetzungsempfehlung

Anne-Frank-Realschule vorerst nicht als Ladepunkt realisiert werden kann. Daraus ergeben sich folgende Änderungen, die in den Ausführungen dieser Machbarkeitsstudie nicht berücksichtigt wurden:

- ▶ *Die Umstellung der Linie 955 auf Elektrobusbetrieb erfolgt nicht in Umsetzungsstufe 1, sondern zu einem späteren Zeitpunkt (voraussichtlich in Umsetzungsstufe 2).*
- ▶ *Alternativ zum Endpunkt Anne-Frank-Realschule sollen die Endpunkte Everslohstraße (Linie SB97/952, Stufe 1) und Heinrich-Böll-Gesamtschule (Linie 955, Stufe 2) als Ladepunkte ausgebaut werden.*

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Teilung der Umläufe

Anhang 2: Energiebilanzierung der Umläufe & Zuordnung Priorität

Anhang 3: Zuordnung Umläufe zu Umsetzungsstufen

Anhang 4: Hochrechnung von Jahresleistungen

Anhang 5: Diagramme Leistungsbedarf Betriebshof

Anhang 6: Einschätzung Ladestandorte

Anhang 7: Vergleich Voll-lader/ Gelegenheitslader & Bewertung und Wichtung

Anhang 8: Entscheidungshilfe Speicherauslegung vs. Platzkapazität

Anhang 9: Investitionskosten

Anhang 10: Betriebs- und Investitionskosten

Anhang 11: Ökologie

Anhang 12: Datengrundlagen

Anhangsverzeichnis