

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

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 Fremdundernehmenleistungen 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 Gesamtleistung. 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.

Elektrifizierung des gesamten STOAG-Busnetzes

Machbarkeitsstudie

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
		<i>Kostenvergl.</i>	<i>0,82 €/km</i>	<i>0,15 €/km</i>	<i>0,03 €/km</i>
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
		<i>Kostenvergl.</i>	<i>1,30 €/km</i>	<i>0,33 €/km</i>	<i>0,14 €/km</i>
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
		<i>Kostenvergl.</i>	<i>1,14 €/km</i>	<i>0,27 €/km</i>	<i>0,08 €/km</i>

Elektrifizierung des gesamten STOAG-Busnetzes

Machbarkeitsstudie

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)

Förderszenarien:

- 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 Elektrobus 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 Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs

Betrachtungszeitraum: 1 Jahr