



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG



ludwig bölkow
systemtechnik



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses als effiziente Möglichkeit für die Nutzung erneuerbarer Energien im ÖPNV

Studie im Rahmen der

Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima

im Auftrag des

Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)

AZ Z14/SeV/288.3/1179/UI40, Ausschreibung vom 19.12.2011

Hauptauftragnehmer:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Verkehrsforschung
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin
Tel.: 030 67055-221, Fax: -283

im Unterauftrag:

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckensstraße 3, 69120 Heidelberg
Tel.: 06221 4767-35

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)
Daimlerstraße 15, 85521 München/Ottobrunn
Tel.: 089 608110-36

Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
Tel.: 0341 2434-423

Erstellt von F. Bergk, U. Lambrecht,
Prof. Dr. R. Pütz (HAW/belicon),
H. Landinger (LBST)

Heidelberg, Landshut, München, 18. Dezember 2015

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	11
2	Hintergrund und Zielsetzung	16
3	Entwicklungen in der Elektrifizierung des städtischen Busverkehrs	17
3.1	Entwicklung und Stand des Oberleitungsbusses	17
3.1.1	Anfänge und Verbreitung des Oberleitungsbusses	17
3.1.2	Niedergang und aktuelle Situation in Deutschland	18
3.1.3	Weiterentwicklung in der Schweiz und in Italien	20
3.1.4	Entwicklung im Rest der Welt	22
3.1.5	Zusammenfassung der Treiber und Hemmnisse im internationalen Vergleich ..	23
3.2	Perspektiven elektrischer Antriebstechnologien in Bussen	24
3.2.1	Steckbriefe Antriebstechnologien	24
3.2.2	Perspektiven Technologieentwicklung	28
4	Definition des Untersuchungsfalles zum Vergleich der Konzepte	30
4.1	Fahrzeuge	30
4.2	Energiebereitstellungsinfrastruktur	32
5	Energiebedarf der Antriebskonzepte	33
6	Umweltwirkungen der Antriebskonzepte	36
6.1	Methodik zum Vergleich der Emissionen und des Energieverbrauches	36
6.1.1	Funktionelle Einheit	36
6.1.2	Lebenswegabschnitte, Bilanzgrenzen und Datengrundlagen	37
6.1.3	Berücksichtigte Umweltwirkungen	37
6.2	Direkte Emissionen in der Nutzung	38
6.2.1	Luftschadstoffe und THG-Emissionen	38
6.2.2	Exkurs Lärm	38
6.3	Emissionen der Strom- und Kraftstoffbereitstellung	39
6.3.1	Dieselmotoren	39
6.3.2	Wasserstoff	40
6.3.3	Strom	41
6.4	Emissionen bei der Herstellung von Fahrzeugen und	

Energiebereitstellungsinfrastruktur	42
6.4.1 Buserstellung	42
6.4.2 Energiebereitstellungsinfrastruktur	43
6.5 Ergebnisse der Umweltbilanzen	44
6.5.1 Emissionen der Buserstellung	44
6.5.2 Emissionen pro Buskilometer (Herstellung und Betrieb).....	45
7 Lebenszykluskosten alternativer Busantriebskonzepte	50
7.1 Fahrzeugkosten.....	50
7.2 Infrastrukturkosten.....	53
7.3 Weitere Kosten	54
7.4 Ergebnisse der Lebenszykluskostenbetrachtung	56
7.4.1 Kosten je Buskilometer	56
7.4.2 Kosten je angebotener Beförderungskapazität.....	58
8 Hemmnisse und Handlungsempfehlungen	63
8.1 Mehrkosten gegenüber Dieselbus	63
8.1.1 Fördersituation von HO-Bus-Fahrzeugen	65
8.1.2 Fördersituation von HO-Bus-Infrastruktur	66
8.2 Städtebauliche Hemmnisse – Erkenntnisse aus dem Fachworkshop	67
8.3 Hemmnisse in den Verkehrsbetrieben	68
8.4 Handlungsempfehlungen zum Abbau der Hemmnisse	69
9 Potential des HO-Busses.....	71
9.1 Städte mit besonderen Treibern zur Elektrifizierung	71
9.2 Städte mit besonderer wirtschaftlicher Eignung für HO-Bus-Systeme.....	72
9.3 Zusammenfassung Potential HO-Bus.....	74
Literaturverzeichnis	75
Anhang I: Ökobilanzdaten	81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kosten je Beförderungskapazität verschiedener Antriebskonzepte für Gelenklinienbusse (18 m Länge)	13
Abbildung 2: Anzahl der O-Bus Systeme in Deutschland und der Welt zwischen 1900 und heute [Spousta, et al., 2013], [Müller, 1995]	18
Abbildung 3: Hess O-Bus unter dem Dach des Busbahnhofs am Bahnhofplatz in Winterthur, JoachimKohlerBremen (Own work) [CC BY-SA 4.0].....	21
Abbildung 4: O-Busstädte je Land in 2015 (eigene Darstellung, aufbauend auf Daten von http://www.trolley-motion.eu)	22
Abbildung 5: Antriebskonzepte von Linienbussen mit hohem Energiebedarf in Abhängigkeit der Batterietechnologie, aufbauend auf [VCDB, 2010]	28
Abbildung 6: Gravimetrische Energiedichten heutiger und zukünftiger Batterietechnologien (Zellebene) [Scherr, 2015], [Schmied, et al., 2013].....	29
Abbildung 7: Abschätzung der monatlichen elektrischen Energieverbräuche zum Beheizen eines Elektrobusses in Deutschland.	36
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Ökobilanzmodells für die Busherstellung.....	42
Abbildung 9: Treibhausgasemissionen bei der Herstellung eines Busses im Jahr 2015	44
Abbildung 10: Stickoxid- und Partikelemissionen bei der Herstellung eines Busses im Jahr 2015.....	45
Abbildung 11: Treibhausgaseffekt der verschiedenen Antriebskonzepte (NZL 2015)	46
Abbildung 12: Treibhausgaseffekt der verschiedenen Antriebskonzepte (NZL 2025)	47
Abbildung 13: Stickoxidemissionen der verschiedenen Antriebskonzepte (NZL 2015)	48
Abbildung 14: Stickoxidemissionen der verschiedenen Antriebskonzepte (NZL 2025)	48
Abbildung 15: Partikelemissionen der verschiedenen Antriebskonzepte (NZL 2015).....	49
Abbildung 16: Partikelemissionen der verschiedenen Antriebskonzepte (NZL 2025).....	49
Abbildung 17: Investitionskosten Fahrzeuge nach Antriebskonzept in automotiver Elektrotechnik, Gelenkbus, 18 m, 2015 und 2025.....	52
Abbildung 18: Jährliche Kosten einer HO-Buslinie in Abhängigkeit von der Beförderungskapazität und dem Jahr	56
Abbildung 19: Kostenvergleich Antriebstechnologien von Gelenkbussen, 18 m (Lebenszykluskosten ohne Fahrerkosten), Takt 7,5 min (Anwendungsfall Eberswalde)	57

Abbildung 20: Linienkosten je Beförderungskapazität 2015 (eine angetriebene Achse, 18m Busse).....	59
Abbildung 21: Linienkosten je Beförderungskapazität 2025 (eine angetriebene Achse, 18m Busse).....	59
Abbildung 22: Kosten je angebotener Kapazität für Busantriebstechnologien bei verschiedenen Taktfrequenzen (2015, 18m Busse).....	60
Abbildung 23: Kosten je angebotener Kapazität für Busantriebstechnologien bei verschiedenen Taktfrequenzen (2025, 18m Busse).....	61
Abbildung 24: Differenzkosten zum Standardfall HO-Bus je angebotenen Platz-km.....	62
Abbildung 25: Darstellung der Finanzierung des ÖSPV, aufbauend auf [Bormann, et al., 2010].....	64
Abbildung 26: Hess LighTram3 in Zürich, von Micha L. Rieser (Own work) [CC BY-SA 3.0]	73
Abbildung 27: Linienkapazitäten verschiedener ÖPNV-Gefäßgrößen und –Systeme in Abhängigkeit des Taktes	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Stand deutscher O-Bussysteme 2015; in Klammern: geplant	20
Tabelle 2: Darstellung der seit 1990 wieder- oder neueingeführten italienischen O-Bussysteme (Stand 2015), aufbauend auf Daten von http://www.trolleyemotion.eu	21
Tabelle 3: Steckbrief Hybrid-Oberleitungsbus (HO-Bus).....	25
Tabelle 4: Steckbrief Gelegenheitslader (GL)/ Opportunity-Charger	26
Tabelle 5: Steckbrief Nachtlader (NL)/ Overnightcharger.....	27
Tabelle 6: Steckbrief Brennstoffzellenhybridbus (BZ-Bus).....	27
Tabelle 7: Betriebliche Parameter in Abhängigkeit des Taktes	30
Tabelle 8: Technische Angaben zu den Antriebskonzepten, Gelenkbus, 18 m.....	31
Tabelle 9: Annahmen Energiebereitstellungsinfrastruktur für den Untersuchungsfall (15 km Linienlänge).....	33
Tabelle 10: Energiebedarf Gelenkbus (Bereitstellungsverluste, Traktionsenergie und Nebenverbraucher ohne Heizung/ Klima) [Pütz, / Haberstock, 2015]	34
Tabelle 11: Jahresenergieverbräuche zum Beheizen eines Gelenkbusses mit Elektroantrieb im Betrieb von 5:00 Uhr bis 23:00 Uhr, eigene Berechnungen	35
Tabelle 12: Direkte Emissionen Luftschadstoffe und THG von 18m-Dieselnbussen [g/ Bus-km]	38
Tabelle 13: Emissionen aus der Bereitstellung von Dieseldieselkraftstoff über unterschiedliche Bereitstellungspfade	39
Tabelle 14: Herkunft des Dieseldieselkraftstoffs	39
Tabelle 15: Emissionen aus der Bereitstellung von Dieseldieselkraftstoff	40
Tabelle 16: Dampfreformieranlage zur Produktion von Wasserstoff vor Ort an der Tankstelle	40
Tabelle 17: Emissionen aus der Bereitstellung CGH ₂ über unterschiedliche Bereitstellungspfade.....	41
Tabelle 18: Herkunft des Wasserstoffs	41
Tabelle 19: Emissionen für die Bereitstellung von komprimierten Wasserstoff (CGH ₂).....	41
Tabelle 20: Emissionen für Strom (Mittelspannung) in Deutschland	42

Tabelle 21: Angenommene Leistungsdichte der Brennstoffzelle und Energiedichten der Batterien in 2015 und 2025	43
Tabelle 22: Umweltwirkungen der Infrastruktur je Buskilometer im Untersuchungsfall, 7,5 Minuten-Takt	43
Tabelle 23: Spezifische Kosten wesentlicher Buskomponenten (nominal in €, 2015)	51
Tabelle 24: Investitionskosten Fahrzeuge nach Antriebskonzept, Gelenkbus, 2015 und 2025 (nominal in €, 2015).....	52
Tabelle 25: Eckdaten Infrastruktur (15 km lange Linie, Einsatz von 15 Bussen)	53
Tabelle 26: Energiekosten im Untersuchungsfall	54
Tabelle 27: Wartungs- und Instandhaltungskosten [€ je Bus-km]	55
Tabelle 28: Austauschzeitpunkte wesentlicher Komponenten während der Buslebensdauer	55
Tabelle 29: Beförderungskapazität je Gelenkbus (18 m) nach Antriebskonzept	58
Tabelle 30: Förderung von alternativen Antrieben bei Gelenkbussen nach Bundesland, aufbauend auf [VDV, 2015], [MIL Thüringen, 2015], [MVI Baden-Württemberg, 2015]	66
Tabelle 31: PM ₁₀ Überschreitungen 2014, nur Verkehrs-Stationen, nur jeweils die Station mit der höchsten Überschreitung je Stadt.....	71
Tabelle 32: NO ₂ Überschreitungen 2014, nur Verkehrs-Stationen, nur jeweils die Station mit der höchsten Überschreitung je Stadt.....	71
Tabelle 33: Emissionen aus Betrieb und Herstellung Wasserstofftankstelle je kWh abgegebener Menge CGH ₂ [LBST, 2015, auf Basis unveröffentlichter Projektarbeiten].....	84
Tabelle 34: Emissionen Herstellung Dieseltankstelle je kWh abgegebener Menge Diesel [ecoinvent 3.1].....	84
Tabelle 35: Sachbilanz der Oberleitungsinfrastruktur pro km [Ebrahimi, 2014]	85
Tabelle 36: Herstellung des Elektroantrieb (Leistung 100 kW) [Habermacher, / Althaus, 2011]	86
Tabelle 37: Materialien des Wasserstofftanks (6 kg H ₂ und 350 bar) [Elgowainy, et al., 2013]	87
Tabelle 38: Sachbilanzdaten der Abgasnachbehandlung inklusive Auspuff nach [Salman, / Chen, 2013].....	87

Abkürzungsverzeichnis

AGVO	Allgemeine Gruppenfreistellungsverordnung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BRT	Bus-Rapid-Transit
BZ	Brennstoffzelle
CEP	Clean Energy Partnership
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CGH ₂	komprimierter Wasserstoff
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
COP	Leistungszahl (Wärmepumpe)
dB(A)	Dezibel (Maßeinheit für Schall)
E	Elektro
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EE-H ₂	Wasserstoff hergestellt aus erneuerbarem Strom
E-H ₂	Wasserstoff hergestellt aus Strom
Fzg.	Fahrzeug
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistung
GL	Gelegenheitslader/ Opportunity Charger
GVFG	Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz
H ₂	Wasserstoff
HBEFA	Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr
H _i	Unterer Heizwert
HO	(Batterie-) Hybrid-Oberleitung
i.N.	Im Normalzustand
K	Kelvin (Temperatureinheit)

Kfz	Kraftfahrzeug
km	Kilometer
kV	Kilovolt (Maßeinheit für Spannung, gleich 1000 Volt)
kWh	Kilowattstunde (Energieeinheit, gleich 1000 Wh)
LFP	Lithium-Eisenphosphat-Zelle
LGVFG	Landesgemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz
Li	Lithium
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MKS	Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie
MWh	Megawattstunde (Energieeinheit, gleich 10 ⁶ Wh)
N ₂ O	Stickstoffmonoxid
NCA	Nickel-Kobalt-Alluminium-Zelle
NKI	Nationale Klimaschutzinitiative
NL	Nachtlader/ Overnight Charger
Nm ³	Normkubikmeter
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt-Zelle
NMVOG	Non-methane volatile organic compounds (Flüchtige Organische Verbindungen, ohne Methan)
NO _x	Stickoxide
NZL	Neuzulassung
O	Oberleitung
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖSPV	Öffentlicher Straßenpersonennahverkehr
Pa	Pascal (Druckeinheit)
PEMFC	Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle
PEMS	Portable Emission Measurement System
PM ₁₀	Feinstaub Partikel (particulate matter), Masse von Partikeln mit einem Durchmesser <10 µm
pphd	Passagiere pro Stunde und Richtung (passenger per hour and direction)

PTC	elektrisches Heizgerät
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquids
SCR	Selektive katalytische Reduktion
SOC	Batterieladestand (state of charge)
SORT2	Testzyklus für Linienbusse (standardised on-road test cycle 2)
t	Tonne (Masseneinheit)
THG	Treibhausgas
TREMOD	Transport Emission Model
TRY	Testreferenzjahr (test reference year)
UBA	Umweltbundesamt
V	Volt (Energieeinheit)
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
Wh	Wattstunde (Energieeinheit)
WtT/WtW	Bezogen auf "Well-to-Tank" (Quelle zum Tank) bzw. "Well-to-Wheel" (Quelle zum Rad)

1 Kurzfassung

Eine Möglichkeit der Dekarbonisierung im Verkehrssektor ist der umfassendere Einsatz von erneuerbarem Strom. Auch der öffentliche Verkehr, der heute zu einem großen Teil mit Dieselnbussen bedient wird, muss hier seinen Beitrag leisten. Ziel der vorliegenden Studie ist es heutige und zukünftige Einsatzbereiche von Hybrid-Oberleitungsbussen (HO-Bus) zu identifizieren. Im Gegensatz zum klassischen Oberleitungsbuss können HO-Busse dabei relevante Strecken batterieelektrisch, also unabhängig von der Oberleitung, zurücklegen. Der HO-Bus wird dabei in dieser Studie mit anderen möglichen elektrischen Bussystemen, dem Gelegenheitslader (GL), dem Nachtlader (NL), dem Brennstoffzellenhybridbus (BZ-Bus) und dem Dieselnbus verglichen.

Unsere Analysen zeigen, dass der Dieselnbus bis 2025 die kostengünstigste Technologie bleibt. Mit konventionellem Dieseln betrieben tragen diese aber wenig zu zentralen Zielen der MKS, wie der Verringerung des Energieverbrauchs, der Reduktion der Treibhausgasemissionen, der Integration erneuerbarer Energien oder der Einführung neuer Technologien bei. Mit fortschreitender Energiewende und Weiterentwicklung der Batterietechnik sind hier Elektrobusse eine wichtige Alternative. Der HO-Bus wird dabei, auch von wichtigen Stakeholdervertretern wie den Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) und dem Deutscher Städtetag¹, als wichtige Technologie in dem Einsatzbereich städtische Linien mit hoher Nachfrage (hohe Taktfrequenz, hohe Gefäßgröße) gesehen.

Elektrobusse haben relevante Umweltvorteile gegenüber Dieselnbussen

Die Verbesserung der Luftqualität und die Verringerung der Lärmbelastung sind die aktuellen Herausforderungen in vielen Städten, neben der Notwendigkeit Schritte für die umfangreiche Reduzierung der Treibhausgasemissionen anzugehen. Der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) soll hierfür einen wesentlichen Beitrag leisten.

Zwar kann durch den konsequenten Einsatz von Dieseln Euro 6-Bussen der ÖPNV schon heute seinen Anteil an den in vielen Städten auftretenden Überschreitungen der PM₁₀- und NO₂- Grenzwerte reduzieren. Der Beitrag zur Lärmreduktion ist jedoch gering. Elektrobusse sind gegenüber Dieselnbussen bei Vorbeifahrt um etwa 5 dB(A) leiser und frei von Luftschadstoffemissionen vor Ort. Diese lokalen Vorteile (Luftqualität, Lärm) sind für Kommunen zentrale Treiber hin zu Elektrobussen, (strategische) Aktionspläne bzw. Verkehrsentwicklungspläne bieten dabei konkreten Anlass zur Diskussion über Elektrifizierung.

Neben der Verbesserung der lokalen Emissionsbelastung können Elektrobussen zu den Zielen der Bundesregierung hinsichtlich der Minderung des Endenergieverbrauches und der Treibhausgasemissionen beitragen:

- Mit einem durchschnittlichen Stromverbrauch inklusive Nebenverbrauchern von 2,1 kWh/km (Nachtlader 2,3 kWh/km, Brennstoffzellenhybridbus 4,5 kWh/km) für einen Gelenkbus können

¹ Martin Schmitz (VDV) und Thomas Kiel (Deutscher Städtetag), Workshop am 27.Oktober 2015 in Berlin

Gelegenheitslader und Hybrid-Oberleitungsbusse den Endenergieverbrauch gegenüber dem Diesel um etwa 60 % reduzieren.

- Mit fortschreitender Energiewende bieten heute angeschaffte Elektrobusse bezogen auf ihre Lebensfahrleistung einen Treibhausgasvorteil gegenüber Dieseln. Die zusätzlichen Treibhausgasemissionen der Herstellung, die insbesondere aus der Batterieproduktion resultieren, können durch die geringeren Emissionen im Betrieb kompensiert werden. Dies gilt insbesondere für Hybrid-Oberleitungsbusse und Gelegenheitslader, die bei einer Neuanschaffung in 2015 über ihre Lebensdauer (bis 2027) eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von etwa 40 % gegenüber dem Dieseln erreichen. Aufgrund höherer Herstellungsaufwände wegen größerer Batterien bzw. geringerer Effizienz ist die spezifische Reduktion von Nachladern und Brennstoffzellenhybridbussen etwa 10 Prozentpunkte niedriger. Für 2025 neu zugelassene Elektrobusse erhöht sich aufgrund der fortschreitenden Energiewende der Klimavorteil gegenüber dem Dieseln weiter.

Hybrid-Oberleitungsbusse sind für relevante Betriebsfälle das günstigste Elektrobuskonzept

Bei dem Vergleich der verschiedenen Elektrobussysteme und des Dieseln wurden dabei sowohl die Fahrzeugkosten, als auch die Kosten für Infrastruktur, Energie, Ersatzinvestitionen, Wartung- und Instandhaltung und für den Fahrer betrachtet. Bezugsgröße des Vergleiches ist die Beförderungskapazität (Passagiere je Stunde und Richtung (pphd) bzw. Platz-km). Die Fahrzeugkosten der Technologien werden auf Basis der Kosten der Einzelkomponenten abgeleitet, um eine bessere Vergleichbarkeit sowie eine Projektion der Kostenentwicklung zu ermöglichen. Es wurde eine Stadtbuslinie mit Gelenkbussen (18 m), 15 km Linienlänge und 18 km/h Durchschnittsgeschwindigkeit (Betriebszyklus SORT2) betrachtet.

Die Infrastrukturkosten für den Hybrid-Oberleitungsbus hängen dabei stark von den Kosten für die Oberleitung ab. Diese ergeben sich aus dem oberleitungsfreien Anteil und den Kosten je Kilometer Oberleitung. Für die Höhe des oberleitungsfreien Anteils ist dabei die Zeit unter der Oberleitung (Potentielle Ladezeit) wesentlich. Für eine wirtschaftliche Ausgestaltung sind daher insbesondere Stellen mit langsamen Geschwindigkeiten (z.B. Linienendpunkte) oder besonders günstigen Oberleitungskosten (z.B. lange gerade Straßenzüge) auszuwählen. Im Untersuchungsfall ist ein oberleitungsfreier Anteil von 50 % bei Oberleitungskosten von 350 000 €/km (beidseitig) angenommen.

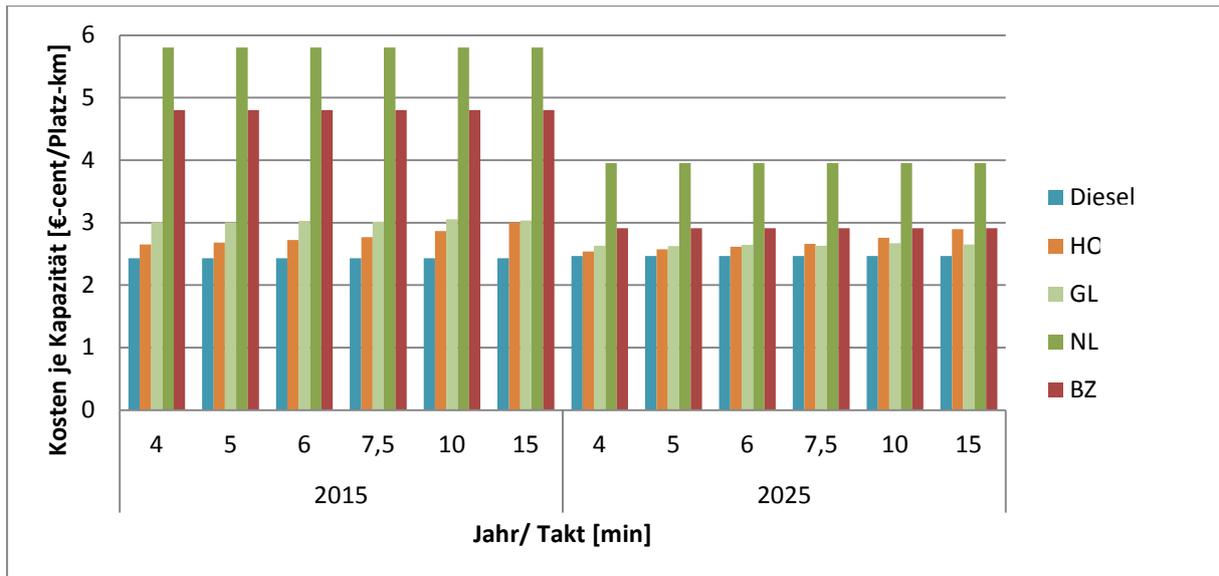


Abbildung 1: Kosten je Beförderungskapazität verschiedener Antriebskonzepte für Gelenklinienbusse (18 m Länge)

Der Hybrid-Oberleitungsbus hat heute im Untersuchungsfall bei einem 10 Minuten Takt Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus von 495 000 € je Linie und Jahr (22 % Mehrkosten je Platz-km). Dabei ist er, wenn eine hohe Beförderungskapazität gefordert ist (ab einem 10 min Takt abwärts, ab 18 m Buslänge), das kostengünstigste Elektrobuskonzept. Im Vergleich zwischen den Elektrobuskonzepten werden die Mehrkosten der Infrastruktur der Hybrid-Oberleitungsbusse zum einen durch geringere Fahrzeugkosten kompensiert, zum anderen haben diese folgende betriebliche Vorteile, aus denen ein geringerer Fahrzeugbedarf als bei den verglichenen Elektrobuskonzepten entsteht:

- Bei Gelegenheitsladern können notwendige minimale Ladezeiten die Wendezeiten an den Linienendpunkten erhöhen. So steigen im Untersuchungsfall in 2015 die Mehrkosten gegenüber dem Hybrid-Oberleitungsbus bei einem 10 Minuten Takt von 7 auf 15 % je Platz-km, wenn zusätzlich drei Minuten Wendezeit Ladezeiten eingeplant werden muss, um die erforderliche Ladezeit zu gewährleisten. Daraus resultieren Mehrkosten von 92 000 € je Linie und Jahr gegenüber dem Hybrid-Oberleitungsbus.
- Bei Nachtladern reduziert die aufgrund der hohen Batteriegewichte eingeschränkte Nutzlast und damit geringeren Beförderungskapazität je Bus die Wirtschaftlichkeit. Bei gleicher Linienkapazität (Hybrid-Oberleitungsbus im 10 Minuten Takt, 92 000 pphd) sind Nachtlader im Untersuchungsfall mehr als doppelt so teuer wie Hybrid-Oberleitungsbusse.

Durch Fortschritte in der Batterietechnologie (Kosten, Energiedichte) gleichen sich bis zum Jahr 2025 die Kosten je Platz-km der Elektrobuskonzepte an. Dabei bleiben Technologien ohne streckenseitige Infrastruktur (Brennstoffzellenhybridbus, Nachtlader) teurer als Konzepte mit streckenseitiger Infrastruktur (Hybrid-Oberleitungsbus und Gelegenheitslader). Zwischen den Hybrid-Oberleitungsbusen und Gelegenheitsladern reduzieren sich die Kostendifferenzen für viele Einsatzbereiche soweit, dass sie vernachlässigbar sind. Bei hohen bis sehr hohen

Beförderungskapazitäten (ab 6 min Takt abwärts, ab 18 m Buslänge) bleibt der Hybrid-Oberleitungsbuss das kostengünstigste Elektrobusskonzept.

Neben den analysierten etablierten 18 m-Gelenkbussen werden in verschiedenen europäischen Städten zunehmend Doppelgelenkbusse eingesetzt. Diese standen aufgrund der noch geringen Bedeutung nicht im Fokus dieser Untersuchung. Aufgrund der oben beschriebenen Ergebnisse kann jedoch darauf geschlossen werden, dass sich für Doppelgelenkbusse das Hybrid-Oberleitungskonzept in besonderem Maß als wirtschaftliche Option anbietet.

Hemmnisse und Handlungsmöglichkeiten zum Einsatz von Hybrid-Oberleitungsbussystemen

Zusammenfassend ist der Einsatz von Hybrid-Oberleitungsbussystemen vor allem in Städten sinnvoll, wo Luftqualitäts- oder Lärmprobleme gelöst werden müssen, anspruchsvolle Klimaschutzziele gelten und nachfragestarke Linien bestehen. Dabei sind für den Einsatz von Hybrid-Oberleitungsbussen gegenüber Dieselnissen insbesondere die Hemmnisse Mehrkosten, Migrationsaufwände und Akzeptanz bei den zentralen Stakeholdern (Kommunen, Verkehrsbetriebe, Bürger/ Nutzer) zu überwinden.

Hybrid-Oberleitungsbusse haben gegenüber dem Dieselnissen heute um 22 % **höhere Lebenszykluskosten**² (0,54 ct/Platz-km). Handlungsoptionen zur Verbesserung der Kostensituation des Hybrid-Oberleitungsbusses sind:

- Eine Abschaffung von Steuern und Abgaben auf im ÖPNV verwendeten Strom analog der bestehenden Energiesteuerbefreiung des ÖPNV auf Mineralölprodukte. Dies würde die Lebenszykluskosten eines von 2015 – 2027 eingesetzten Hybrid-Oberleitungsbusses um 0,11 ct/ Platz-km senken. Eine Gegenfinanzierung könnte über eine mittelfristige und schrittweise Wiedereinführung der Energiesteuer auf im ÖPNV eingesetzte fossile Treibstoffe erfolgen.
- Für einen Übergangszeitraum wäre eine zusätzliche Förderung der Fahrzeugmehrkosten gegenüber dem Dieselnissen hilfreich. Eine Förderquote von 40 % auf die Fahrzeugmehrkosten würde die Lebenszykluskosten im Untersuchungsfall um 0,08 ct/ Platz-km senken. Dabei ist auf ein abgestimmtes Vorgehen mit den Ländern zu achten, die teilweise ebenfalls Förderung als Kompensation für Mehrkosten von Elektrobussen anbieten.
- Neben den Lebenszykluskosten wirkt sich die Finanzlage der Kommunen auch auf die Fähigkeit aus, die für den Hybrid-Oberleitungsbuss notwendigen (im Vergleich mit den anderen Elektrobusskonzepten höheren) Anfangsinvestitionen in die notwendige Infrastruktur zu tragen. Investive Maßnahmen im ÖPNV werden dabei in der Regel nicht von den Kommunen alleine finanziert. Der Bund sollte hier auf eine Gleichstellung von Elektrobussinfrastruktur mit Straßenbahninfrastruktur in den entsprechenden Ländergesetzen hinwirken. Eine Förderung der Infrastruktur von 80 % (wie z.B. in Thüringen) würde die Lebenszykluskosten von Hybrid-Oberleitungsbussen um 0,22 ct/Platz-km senken.

² Die folgenden Angaben zu den finanziellen Auswirkungen je Platz/km beziehen sich dabei jeweils auf den Untersuchungsfall mit einem 10 Minuten Takt

Mit der Anwendung der dargestellten Handlungsoptionen ergeben sich folgende Kostenunterschiede zwischen Diesel und HO-Bus:

- In 2015 würden mit der Befreiung vom EEG sowie der Förderung von Fahrzeugmehrkosten und Infrastruktur bei einem 10 Minuten Takt Mehrkosten von 5 % beim HO-Bus auftreten.
- In 2025 wäre mit der Infrastrukturförderung sowie den Änderungen bei den Energiekosten (Befreiung von EEG und Stromsteuer bei gleichzeitiger Abschaffung der Energiesteuerbefreiung auf fossile Kraftstoffe) ab einem 6 Minuten Takt Kostenparität erreicht. Ab 6 Minuten Takt ist der HO-Bus auch das kostengünstigste Elektrobuskonzept.

Für die Verkehrsbetriebe bedeutet der Umstieg auf Elektrobusse **Migrationsaufwände** durch:

- komplexere Betriebsabläufe aufgrund des Vorhandenseins mehrerer unterschiedlicher Antriebssysteme (bei zumindest übergangsweise Beibehaltung des Dieselmotors)
- veränderte Anforderungsprofile an die Mitarbeiter und somit ein umfangreicher Weiterbildungsbedarf bei einer tendenziell älteren Mitarbeiterschaft bzw. eine Konkurrenzsituation insbesondere mit der Automobilwirtschaft um gut ausgebildete Mechatroniker
- Aufbrechen vorhandener Herstellerbeziehungen, wenn die Stammmarken keine Hybridoberleitungsbusse herstellen (einziger Hersteller mit Hybrid-Oberleitungsbusen im Programm mit relevantem Marktanteil in Deutschland ist Solaris mit 13% in 2013)

Insbesondere der VDV ist dabei gefragt, Weiterbildungs- und Vernetzungsangebote anzubieten. Diese Angebote könnten vom Bund unterstützt werden.

Die **Akzeptanz** des HO-Busses bei den zentralen Stakeholdern, dies sind in den Kommunen die politischen Entscheidungsträger, die Verwaltung, die Verkehrsbetriebe und die Bürger, wird bisher oft beeinträchtigt durch die Wahrnehmung als eine veraltete Fahrzeugtechnologie mit umfassenden Oberleitungsstrukturen. Durch die Hybrid-Oberleitungstechnologie kann in sensiblen Bereichen auf Oberleitungen verzichtet werden. Zudem existieren attraktivere Lösungen zur besseren städtebaulichen Integration der Leitungen.

Von Beginn an als Hybrid-Oberleitungsbussysteme geplante **Pilotprojekte**, die vom Bund gefördert werden könnten, sollten daher insbesondere den deutlichen Entwicklungsschritt bei den Möglichkeiten der städtebaulichen Integration gegenüber dem klassischen Oberleitungsbus aufzeigen und diesen über Marketingkampagnen, z.B. über Broschüren, an interessierte Bürger und Kommunen kommunizieren. Pilotprojekte können darüber hinaus helfen, bei den Kommunen und Verkehrsbetrieben Unsicherheiten über die Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Hybrid-Oberleitungsbusse zu reduzieren sowie weitere Hersteller von Bussen motivieren, dieses Antriebskonzept anzubieten.

2 Hintergrund und Zielsetzung

Der Verkehrsbereich muss seinen Beitrag zur Umsetzung des Energiekonzepts der Bundesregierung leisten. Ziel für den Verkehrssektor ist die Reduzierung des Endenergieverbrauchs bis 2020 um rund 10 % und bis 2050 um rund 40 % gegenüber 2005 [Bundesregierung, 2010]. *„Die wesentlichen Voraussetzungen für das Erreichen der Ziele sind die Diversifizierung der Energiebasis des Verkehrs mit alternativen Kraftstoffen in Verbindung mit innovativen Antriebstechnologien, die weitere Steigerung der Energieeffizienz von Verbrennungsmotoren und die Optimierung der Verkehrsabläufe.“* [Bundesregierung, 2013].

Der öffentliche Personenverkehr mit Bussen ist ein wichtiges Standbein der städtischen Mobilität und kann durch die Verlagerung von MIV-Verkehrsleistung bereits heute einen zentralen Beitrag zur Minderung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen leisten. Sollen anspruchsvolle Umweltziele erreicht werden, müssen jedoch im ÖPNV langfristig fossile Endenergieträger durch Erneuerbare ersetzt werden. Die direkte Nutzung von EE-Strom weist dabei den höchsten Wirkungsgrad in Bezug auf den Einsatz von Primärenergie auf. Der elektrische ÖPNV findet heute jedoch fast ausschließlich auf der Schiene statt. Auf der Straße werden in Deutschland zu 96 % dieselbetriebene Busse eingesetzt [VDV, 2014], der Anteil von elektrisch angetriebenen Bussen beträgt weniger als 1 %. Daraus ergeben sich für die nächsten Jahrzehnte große Herausforderungen bei der Minderung des Endenergieverbrauchs sowie der Treibhausgasemissionen.

Derzeit werden verschiedene Elektrifizierungskonzepte diskutiert, von denen eines der Hybrid-Oberleitungsbus (HO-Bus) ist. In Abgrenzung zu einem konventionellen Oberleitungsbus mit elektrischem Hilfsantrieb ist die Batterie bei einem HO-Bus so dimensioniert, dass deren Kapazität ausreicht um relevante Betriebsanteile oberleitungsfrei zurücklegen zu können.

Diese Technologie bietet große Potenziale zur Elektrifizierung des Busverkehrs und damit zu den oben genannten Zielen der Bundesregierung (Effizienzverbesserung, neue Antriebssysteme, Diversifizierung der Energiebasis) für den Verkehrssektor beizutragen, wie bereits in der vom BMVBS beauftragten Studie „Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie und Steigerung der Energieeffizienz im öffentlichen Personennahverkehr“ festgestellt wurde:

„Prinzipiell ist auch eine Renaissance der O-Busse denkbar, insbesondere wenn durch bessere Speichertechnologie das zeitweise oberleitungsfreie Fahren ermöglicht wird. Dies hätte den Vorteil, dass auf eine bereits bewährte Technologie gesetzt würde, besonders aber in Innenstädten auf die teilweise als störend empfundene Oberleitung verzichtet werden könnte. Letztlich müssten aber in diesem Fall größere Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur getätigt werden. Die Erfahrungen aus der Schweiz zeigen, dass der höhere Investitionsaufwand für Oberleitungen sich allerdings nur bei aufkommensstarken Linien amortisiert.“ [Schmied, et al., 2013]

Ziel dieser MKS-Studie ist es, das Potenzial von HO-Bussen in Hinblick auf die Minderung des Energieverbrauchs sowie der Treibhausgasemissionen genauer zu betrachten.

Dazu werden in dieser Studie folgende Punkte behandelt:

- Überblick zum Stand elektrischer Buskonzepte. Darstellung des Standes zum Einsatz von Oberleitungsbussen sowie Darstellung von Rahmenbedingungen, Erfahrungen und aktuellen Entwicklungen im internationalen Kontext (Kapitel 3).
- Definition und Einordnung des Untersuchungsfalles zum Vergleich der betrachteten Antriebstechnologien hinsichtlich der betrachteten Fahrzeuge und der benötigten Energiebereitstellungsinfrastruktur (Kapitel 4).
- Energie- und Umweltbilanz von HO-Bussen im Vergleich zu anderen Busantrieben (Diesel, Batterieelektrisch, Brennstoffzelle) (Kapitel 5 und 6).
- Kalkulation der Lebenszykluskosten des HO-Busses im Vergleich zu anderen Antriebsarten (Kapitel 7).
- Analyse von Hemmnissen bei der Einführung von HO-Bussen und Diskussion von Handlungsempfehlungen mit Fokus auf Handlungsmöglichkeiten des Bundes (Kapitel 8).
- Zusammenfassung der Hemmnisse und Chancen von HO-Bussen im Vergleich mit anderen Antriebsarten und Abschätzung des Potentials für den Einsatz von HO-Bussen (Kapitel 9).

3 Entwicklungen in der Elektrifizierung des städtischen Busverkehrs

3.1 Entwicklung und Stand des Oberleitungsbusses

Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über die Entwicklung des O-Busses gegeben. Es wird insbesondere erläutert, was zum Niedergang des O-Busses in Deutschland geführt hat, was das Fortbestehen des O-Busses in anderen Ländern begünstigt hat und welche Systeme sich heute noch (beziehungweise wieder) im Betrieb befinden.

3.1.1 Anfänge und Verbreitung des Oberleitungsbusses

Als Erfinder des O-Busses gilt Werner von Siemens, der 1882 in Berlin der Öffentlichkeit ein als „Elektromote“ bezeichnetes Versuchsfahrzeug vorstellte [Achilles, 2008; Schaden, Mackinger, 2004]. Weltweit wurden ab 1920 zahlreiche O-Busbetriebe hauptsächlich als Alternative zu Straßenbahnen eingeführt [Björklund, et al., 2000; Mackinger, 2014]. Zu den Hauptgründen für die Einführung des O-Busses zählten:

- Geringere Investitionskosten für Linienenerweiterungen (bzw. für die Reparatur der kriegsbedingten Schäden nach dem 2. Weltkrieg) im Vergleich zur Straßenbahn [Achilles, 2008; Spousta, et al., 2013].
- Bessere Leistungsfähigkeit, insbesondere bessere Beschleunigung, des Motors im Vergleich zum Dieselbus [Huober, 2008; Trolley-motion, 2015a].
- Größerer Komfort und damit größere Akzeptanz in der Bevölkerung durch leiseres und schnelleres Fahren im Vergleich zu Straßenbahn und Dieselbus [Achilles, 2008; Spousta, et al., 2013].

Bedingt durch die große Nachfrage waren zwischen 1940 und 1950 in den meisten europäischen Großstädten auch Hersteller von O-Bussen ansässig [Spousta, et al., 2013]. Den Höhepunkt erreichte

der O-Bus in Deutschland in der Mitte der 1950er Jahre mit insgesamt knapp 70 gleichzeitig betriebenen Systemen. Global gesehen wurde der Höhepunkt in den 1960er Jahren erreicht mit insgesamt ca. 400 betriebenen Systemen (siehe Abbildung 2).

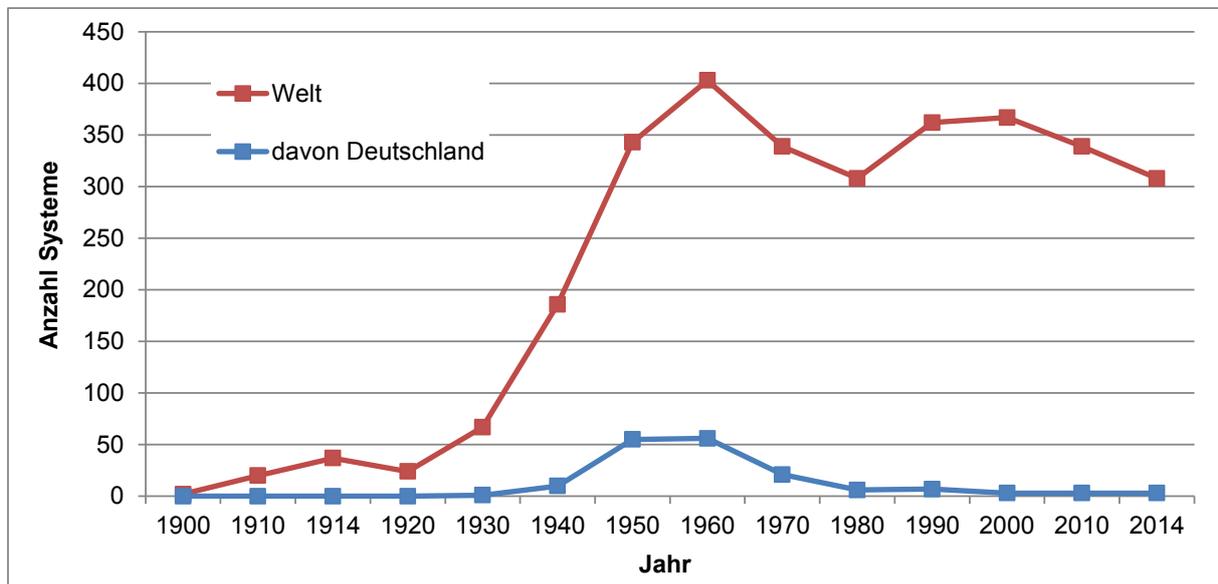


Abbildung 2: Anzahl der O-Bus Systeme in Deutschland und der Welt zwischen 1900 und heute [Spousta, et al., 2013], [Müller, 1995]

Deutschland gehörte dabei, neben Großbritannien, den osteuropäischen Staaten, aber auch der Schweiz und Italien zu den Ländern, in denen die meisten O-Bussysteme betrieben wurden [Wotek, Wyszomirski, 2013]. Technische Entwicklungen an den Fahrzeugen zur Bedienung des größer werdenden Fahrgastaufkommens umfassten die Etablierung von Anhängern sowie die Herstellung von Gelenkbussen [Spousta, et al., 2013]. Mit Beginn der 1960er Jahre kam es in vielen Städten westlicher Staaten zu einer Trendwende (siehe Kapitel 3.1.2) und der O-Bus wurde wieder abgeschafft [Björklund, et al., 2000]. In der Mitte der 1970er Jahre waren in Großbritannien, Belgien, Dänemark, Finnland und Schweden bereits sämtliche O-Busse abgeschafft, während die Anzahl der installierten Systeme in Frankreich, Deutschland, den Niederlanden und Spanien deutlich zurückgegangen war [Spousta, et al., 2013].

3.1.2 Niedergang und aktuelle Situation in Deutschland

In vielen deutschen Städten fand der O-Bus nur für eine Zeitspanne von 15 bis 25 Jahren Anwendung. Als nach abgelaufener Lebensdauer der eingeführten Flotte Neuanschaffungen anstanden, fiel die Entscheidung in den Kommunen vielfach zugunsten der Straßenbahn oder des Dieselmotors an [Haase, 2007]. Dieser konnte, durch die günstige Übertragbarkeit technischer Weiterentwicklungen für dieselbetriebene Lkws, Reisebusse etc. sowie die in der Produktion gegebenen ökonomischen Skaleneffekte [Björklund, et al., 2000; Mackinger, 2014] in den 1960er Jahren einen deutlichen Entwicklungssprung machen, der sich insbesondere durch eine stark verbesserte Leistung und Zuverlässigkeit der Motoren [Björklund, et al., 2000] ausgedrückt hat.

Unabhängig von den Entwicklungen und Vorteilen des Dieselmotors lassen sich folgende weitere strukturelle Gründe und Hemmnisse gegen ein Fortbestehen des O-Busses in Deutschland identifizieren:

- Der verkehrspolitische Paradigmenwechsel zugunsten des privaten Pkws und einer „autogerechten Stadt“ machte die Fortführung des teuren, wenngleich komfortableren O-Bussystems weniger attraktiv [Mackinger, 2014].
- Umweltvorteile des O-Busses (Lärm, lokale Emissionen) spielten in den 1960er Jahren für das Meinungsbild der Bevölkerung ebenso wie für die Entscheidungsfindung in Politik und Planung eine untergeordnete Rolle [Björklund, et al., 2000; Mackinger, 2014; Wotek, Wyszomirski, 2013].
- Kraftstoffe wurden in diesem Zeitraum immer günstiger [Björklund, et al., 2000; Wotek, Wyszomirski, 2013], u.a. aufgrund der 1954 abgeschafften Einfuhrzölle für Mineralöl [Lehmann, 2013].
- Das Befördern von Personen in an den O-Bus angehängten Wagen wurde 1960 verboten, sodass die Beförderungskapazität pro Bus stark sank [SVE, 2015].
- Mit der Firma Henschel stellte 1962 der letzte Komplettlieferant die Produktion von O-Bussen ein [Lehmann, 2015a].
- Die dynamische Entwicklung der Dieselmotortechnologie und die genannten Rahmenbedingungen brachten dem O-Bus das Image einer „Dinosauriertechnologie“ ein [Haase, 2012; Kudlicza, 2009]. Dies wiederum begünstigte eine einseitige Beratung politischer Entscheidungsträger durch Stadt- und Verkehrsplaner, sodass der O-Bus in eine Nische verdrängt wurde [Haase, 2007, 2012]. Infolgedessen kamen technische Weiterentwicklungen bei den O-Bussen zum Erliegen, während bei den Dieselmotoren viele Innovationen (z.B. Niederflertechnik) eingeführt wurden.

In Deutschland haben sich lediglich Systeme in den Mittelstädten Eberswalde und Esslingen sowie Solingen als einer kleineren Großstadt (siehe Tabelle 1) gehalten. Dies stellt insofern eine Besonderheit dar, da im internationalen Vergleich in Ländern mit wenigen O-Bus-Systemen (≤ 5) diese in der Regel in den Metropolen zu finden sind. Nach zwischenzeitlichen Schließungsplänen ist in den drei genannten deutschen Städten der Betrieb gesichert und es sind folgende Projekte zur Netzerweiterungen bzw. zur Modernisierung geplant:

- **Eberswalde:** Planungen zur Ausweitung des elektrischen Betriebs durch Umwandlung der Dieselmotortrasse nach Finowfurt in eine HO-Buslinie (Erweiterung des elektrischen Linienbetriebs um 18 km, dabei Erweiterung der Oberleitungsinfrastruktur um 5 km). [Rutscher, 2015]
- **Esslingen:** Anschaffung von vier HO-Bussen und Umstellung der Buslinie nach Berkheim auf elektrischen Betrieb unter Nutzung der vorhandenen Infrastruktur ab Mai 2016. [TrolleyMotion, 2015b]
- **Solingen:** „O-Bus 2020“-Projekt: Umstellung einer Dieselmotortrasse auf Elektrobetrieb mittels HO-Bussen. Optimierung des Oberleitungsnetzes zu einem „Smart Grid“ (Nutzung des Oberleitungsnetzes für Speicherung und intelligente Verteilung von Energie). [Zid, 2015]

Tabelle 1: Stand deutscher O-Bussysteme 2015; in Klammern: geplant

Stadt	Einwohner	Einführungsjahr	Anzahl Linien	Anzahl O-Busse	davon HO-Busse
Eberswalde	40.000	1940	2	12	1
Esslingen	90.000	1944	2	9	0 (4)
Solingen	150.000	1952	6	50	0 (4)

3.1.3 Weiterentwicklung in der Schweiz und in Italien

Während in Deutschland und vielen anderen Ländern in den 1960er Jahren ein Großteil der installierten O-Bussysteme aufgegeben wurde, hielten andere Länder an ihren Systemen fest und führen sie teilweise bis heute fort. Dazu gehören die Staaten der ehemaligen Sowjetunion, China, Nordkorea, die Schweiz und Italien. Deutschlands politische und wirtschaftliche Situation ist dabei am ehesten mit der Schweiz und mit Italien vergleichbar. In diesen Ländern hat auch im Wesentlichen die technologische Weiterentwicklung des O-Busses nach den 1960er Jahren stattgefunden, die folgende Aspekte umfasst:

- Die Adaption von Eisenbahntechnik, wie elektrische Traktionskomponenten, z.B. Entwicklung und Anwendung des Thyristorantriebs.
- Adaption von Entwicklungen des Dieselmotors, wie die Steigerung Fahrkomfort durch Verbesserungen der Lenkung, Federung und die Einführung von Klimaanlage, Niederflurtechnik [Spousta, et al., 2013].
- Umsetzung von neuen Technologien im Busbereich, wie Doppelgelenkbusse oder Spurführung.

In **Italien** gelang es dem O-Bus, sich nach seiner Einführung ab 1930 als identitätsstiftendes, positiv wahrgenommenes Element im Bewusstsein der Bevölkerung zu verankern [Fratolocchi, 2012]. So sind nach der Einführung u.a. signifikant angestiegene Fahrgastzahlen dokumentiert [Fratolocchi, 2012]. Bei Befragungen der Bevölkerung, ob das als teurere Alternative ausgewiesene O-Bussystem beibehalten werden soll, gab es teilweise ein klares Votum für den O-Bus als bestes öffentliches Verkehrsmittel [Fratolocchi, 2012]. Für spezielle Testläufe wurden in den vergangenen Jahren wiederholt die historischen Stadtkerne ausgewählt [Spousta, et al., 2013], was die starke Akzeptanz in der Gesellschaft unterstreicht. Auf ökonomisch-technischer Ebene begünstigte die stark ausgeprägte Herstellerlandschaft die Entwicklung des O-Bus in Italien, die schon in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts eine Vorreiterrolle bei technischen Weiterentwicklungen eingenommen hat [Spousta, et al., 2013]. In der Zeit zwischen 1960 und 1990, in der auch in Italien viele Betriebe eingestellt wurden, wurden die Oberleitungen teilweise nicht demontiert [Burmeister, 2013], sodass erstens der frühere O-Busbetrieb bei der Bevölkerung und den Stadtplanern weniger leicht in Vergessenheit geriet und zweitens eine Wiedereinführung wie in Bologna und Genua unter technisch und ökonomisch günstigeren Bedingungen realisiert werden konnte. Für die auffällig große Anzahl an Wieder- bzw. Neueinführungen seit 1990 – darunter auch in Rom – werden vor allem ökologische Kriterien als ursächlich angesehen [Heer, et al., 2013].

Tabelle 2: Darstellung der seit 1990 wieder- oder neueingeführten italienischen O-Bussysteme (Stand 2015), aufbauend auf Daten von <http://www.trolleyemotion.eu>

Stadt	Einwohner	Anzahl Linien	Anzahl Busse	(Wieder-) Einführungsjahr	Besonderheit
Avellino	60 000	1	11	2015	
Bologna	370 000	4	46	1991	
Genova	600 000	2	34	1997	
Lecce	90 000	3	12	2012	
Pescara	120 000	1	6	2011	Abschnittsweise Spurführung, eigene Spur
Roma	2 554 000	1	30	2005	Regelbetrieb mit Batterietraction (3 km oberleitungslos)
Verona	260 000	2	37	2015	Supercaps (Keine Oberleitung im Zentrum)



Abbildung 3: Hess O-Bus unter dem Dach des Busbahnhofs am Bahnhofplatz in Winterthur, JoachimKohlerBremen (Own work) [CC BY-SA 4.0]³

³https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AHess_SwissTrolley_Bus_am_Busbahnhof_beim_Hauptbahnhof_Winterthur.jpg

Anders als in Italien wurden in der **Schweiz** die meisten eingeführten O-Bussysteme ohne zwischenzeitliche Stilllegung kontinuierlich weiterbetrieben. Es ist auffällig, dass die seit 1960 für den Rest Westeuropas beschriebenen Stilllegungsargumente (siehe oben) in der schweizer Literatur nicht erwähnt werden und stattdessen ein stetiger Ausbau geschildert wird [Stadtbus Winterthur, 2013; VBSG, 2007]. Für die besondere Rolle des O-Busses in der Schweiz werden in der Literatur folgende Hauptgründe gesehen:

- Der von Wasserkraft dominierte Schweizer Strommix führt dazu, dass der O-Bus im Vergleich zum Antrieb mit Verbrennungsmotoren als umweltfreundlichere und kostengünstigere Alternative betrachtet wird.
- In der teilweise anspruchsvollen Topografie ist die bessere Leistungsfähigkeit des O-Busses bei geringer Lärmentwicklung besonders vorteilhaft [Deutsch, 2003; Trolley-motion, 2015a; Zavada, et al., 2010].

Die für Italien bereits angeführten Aspekte einer etablierten und aktiven Herstellerlandschaft und einer hohen Identifikation der Bevölkerung mit dem O-Bus gelten auch für die Schweiz [Schweizer, 2006; Tica, et al., 2011], die mehrfach bei Volksabstimmungen positiv zum O-Bus votiert haben [Lehmann, 2015b].

3.1.4 Entwicklung im Rest der Welt

Weltweit sind derzeit ca. 40.000 O-Busse in über 300 Städten auf über 2.400 Linien in Betrieb [Korolkov, et al., 2015; Trolley-motion, 2015c]. Dabei besteht eine Dominanz von Staaten der ehemaligen Sowjetunion und anderer (ehemals) sozialistischer Länder, die zusammen über drei Viertel aller betriebenen O-Bussysteme stellen. Zwar mussten nach 1989 die Systeme in den Ländern der ehemaligen Sowjetunion teilweise aufgegeben werden, viele konnten aber auch unter den geänderten Rahmenbedingungen weiter betrieben werden [Spousta, et al., 2013].

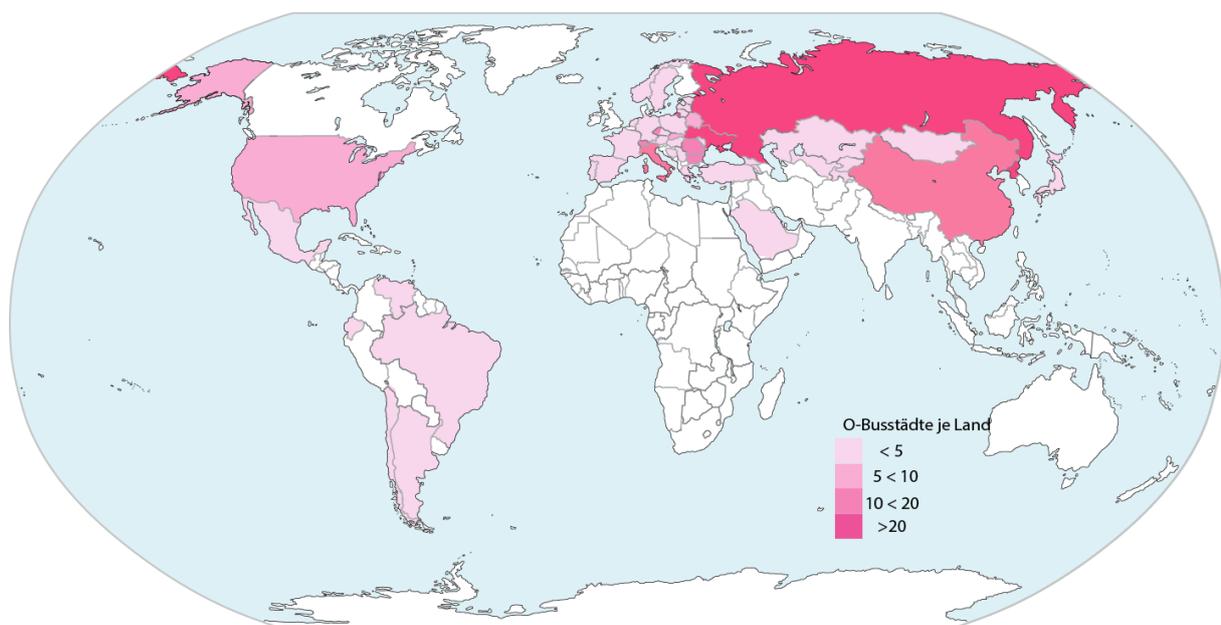


Abbildung 4: O-Busstädte je Land in 2015 (eigene Darstellung, aufbauend auf Daten von <http://www.trolley-motion.eu>)

Als Maßnahme zur Elektrifizierung des Straßenverkehrs und zur Verringerung lokaler Emissionen insbesondere in Kombination mit Batterien stellt der O-Bus dabei in vielen Ländern in der jüngeren Vergangenheit für Stadtplaner wieder ein attraktives Konzept dar. Ein Beispiel hierfür ist die Entwicklung in Peking, wo aufgrund der massiven Luftqualitätsprobleme das vorhandene O-Bussystem bis 2020 um 640 HO-Busse erweitert werden soll.⁴

Beispiel Malatya, Türkei (426 000 Einwohner)

Für den am 11.03.2015 eröffneten O-Busbetrieb in Malatya wurde von der Firma Bozankaya eine erste Trolleybuslinie mit 37,4 km Gesamtlänge für 19,6 Mio. € gebaut. Das „Trambüs“ genannte Konzept setzt dabei wesentliche Gedanken eines Bus-Rapid-Transits (BRT) um: Es existieren abgetrennte Bussteige, die nur mit Fahrkarten betreten werden können und somit zu kurzen Fahrgastwechselzeiten führen. Zudem werden Fahrzeuge mit sehr hohen Fahrgastkapazitäten (Doppelgelenkwagen des deutsch-türkischen Herstellers Bozankaya mit elektrischer Ausrüstung der Firma Vossloh-Kiepe) eingesetzt, die teilweise auf eigenen Busspuren verkehren. BRTs können dabei eine mit Straßenbahnen vergleichbare Transportleistung erreichen, was durch den bisher im Testbetrieb gefahrenen 12-15 Minuten-Takt jedoch noch nicht genutzt wird. Eine Erweiterung um 6,1 km ist bereits geplant⁵.

3.1.5 Zusammenfassung der Treiber und Hemmnisse im internationalen Vergleich

Aus der derzeitigen Situation lässt sich je nach Region eine unterschiedliche Konstellation an Treibern und Hemmnissen für eine weitere Verbreitung des O-Busses erkennen. Bezogen auf Deutschland sind die wesentlichen Punkte:

Ökonomie

- Höhere Kosten für Fahrzeuge und Infrastruktur als beim Dieselbus. Demgegenüber stehen aber deutlich niedrigere Investitionskosten als für Straßenbahnen.
- Finanzmittel für ÖPNV stark begrenzt, insbesondere bei den Kommunen ist wenig Spielraum für über die Daseinsvorsorge hinausgehende Lösungen, solange diese nicht zum Großteil vom Bund oder den Ländern finanziert werden.
- Derzeit kein Hersteller kompletter O-Busse mehr in Deutschland angesiedelt (aber mehrere Komponentenhersteller), und somit wenig industriepolitisches Interesse an O-Busförderung.

Akzeptanz

- Höheres Umweltbewusstsein – sowie regulatorische Anforderungen – führen zu einem zunehmenden Attraktivitätsverlust des Dieselbusses.
- Keine durchgehende positive O-Buskultur wie in Italien oder in der Schweiz.
- Häufig Bedenken gegen die Oberleitungsinfrastruktur.

⁴ <http://sustainabletransport.org/one-goal-two-approaches-electric-buses-in-china-and-germany/>, zuletzt abgerufen am 5.12.2015

⁵ http://www.trolleybus.eu/www/index.php?id=38&L=0&n_ID=2357, zuletzt abgerufen am 5.12.2015

Betriebsbedingungen

- Kein BRT-System in Deutschland, bei entsprechender Nachfrage wird auf die als komfortabler wahrgenommene Straßenbahn zurückgegriffen.
- Wenige topografisch anspruchsvolle Strecken, in denen O-Busse betriebliche Vorteile gegenüber Dieselnissen haben.

3.2 Perspektiven elektrischer Antriebstechnologien in Bussen

Neben der erprobten O-Bustechnologie werden derzeit eine Reihe weiterer elektrischer Antriebskonzepte für Linienbusse diskutiert, die sich in der Markteinführung bzw. kurz davor befinden. Diese werden im folgendem kurz dargestellt. Zudem wird ein kurzer Ausblick auf mögliche Entwicklungen der Konzepte bei Fortschritten in der Batterieentwicklung gegeben.

3.2.1 Steckbriefe Antriebstechnologien

Neben Dieselnissen werden derzeit folgende Elektrobusse in Deutschland, zumeist in Pilotvorhaben, eingesetzt:

- Hybrid-Oberleitungsbus (HO-Bus)
- Gelegenheitslader (GL)
- Nachtlader (NL)
- Brennstoffzellenhybridbus (BZ-Bus)

Diese Technologien sind prinzipiell für einen zukünftigen elektrifizierten Linienbusverkehr einsetzbar. Zentrale Eigenschaften dieser Konzepte und der derzeitige Einsatz in Deutschland sind in den folgenden Steckbriefen zusammengefasst:

Tabelle 3: Steckbrief Hybrid-Oberleitungsbus (HO-Bus)

<p>Kurzbeschreibung Konzept</p>	<p>Bus mit Elektromotor und Batterie, der in zwei Modi betrieben wird:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Während des Betriebs unter der Oberleitung wird der gesamte Stromverbrauch in der Regel aus der Oberleitung gedeckt. Zudem kann währenddessen die Batterie geladen werden. • Abseits der Oberleitung können aufgrund der entsprechend dimensionierten Batteriegröße relevante Betriebsanteile batterieelektrisch erbracht werden.
<p>Wesentliche Komponenten</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Fahrzeug:</i> Batterie, Pantograph, Leistungselektronik • <i>Infrastruktur:</i> Oberleitung, Unterwerk
<p>Zentrale Eigenschaften</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Eignet sich besonders für Linien mit hohem Energiebedarf (hohes Verkehrsaufkommen, anspruchsvolle Topographie, kalte Region). Da der Energiebedarf des HO-Busses zudem während des Betriebes in der Regel vollständig aus der Ladeinfrastruktur gedeckt wird, können HO-Busse theoretisch im 24 h-Betrieb laufen. • Fahrzeuge werden in bestimmten Linien (Oberleitung vorhanden) eingesetzt. Damit nicht vollständig flexibel im Gesamtnetz einer Stadt einsetzbar. • Flexibilität der Linienführung von Batteriegröße abhängig. • Infrastruktur sehr leistungsfähig auch für Linien mit hohem Verkehrsaufkommen. Investitionen dafür höher als bei anderen Bus-Konzepten.
<p>Ausgewählte Projekte/ Planungen in Deutschland</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Eberswalde: Die erst 2010 erneuerte Flotte setzt sich aus elf Diesel-Hybrid-O-Bussen und einem Batterie-Hybrid-O-Bus zusammen, jeweils mit eingebauten Supercaps. Die Entscheidung zur Erneuerung der Flotte und damit zur Beibehaltung des Systems basierte auf einem seit vielen Jahren reibungslosen Betrieb und auf hoher Akzeptanz in der Bevölkerung [ifeu, 2015a; Neumann, 2009]. • Esslingen: Für Ende 2015 ist die Ergänzung der Flotte um vier Batterie-Hybrid-O-Busse geplant [Trolley-motion, 2014]. • Solingen: Im Rahmen des Projekts „O-Bus 2020“ soll eine mit Diesel-Omnibussen betriebene Linie auf vier vollelektrische Busse umgestellt werden. Auch ist die Kopplung des Oberleitungsnetzes mit dem öffentlichen Stromnetz geplant, um Energie zu speichern und im Sinne eines smart grid intelligent und effizient zu verteilen [Zid, 2015].

Tabelle 4: Steckbrief Gelegenheitslader (GL)/ Opportunity-Charger

<p>Kurzbeschreibung Konzept</p>	<p>Bus mit Elektromotor und Batterie, der neben der Nachtladung im Betriebshof, im Tagesverlauf über konduktive oder induktive Schnellladung</p> <ul style="list-style-type: none"> • an Haltestellen und/oder • an den Linienendpunkten <p>zusätzlich mit Energie versorgt wird.</p>
<p>Wesentliche Komponenten</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Fahrzeug:</i> Batterie (in aktuellen Projekten zwischen 60 und 160 kWh), Pantograph (konduktiv bis zu 500kW) oder Empfangsschleife (induktiv bis zu 200 kW), Leistungselektronik • <i>Infrastruktur:</i> Unterwerk, Schnelllader
<p>Zentrale Eigenschaften</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Betriebsbedingungen sollten ausreichend Ladezeiten erlauben. Insbesondere verspätungsanfällige Linien sind problematisch. • Von Infrastruktur abhängig (wenn auch gewisse Freiheitsgrade), daher kein beliebiger Einsatz im Liniennetz.
<p>Ausgewählte Projekte/ Planungen in Deutschland</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Berlin: Einsatz von vier Solobusse (Hersteller Solaris) mit induktiver Ladung über das Primove System von Bombardier. • Hannover: Einsatz von drei Solobussen (Hersteller Solaris) mittels konduktiver Ladung. Dabei wird auf die Stromversorgung der Straßenbahn zurückgegriffen und die Busse teilweise mit Rekuperationsstrom der Straßenbahn betrieben. • Braunschweig: Einsatz von einem Solobus und drei Gelenkbussen (Hersteller Solaris) mittels induktiver Ladung über das Primove System von Bombardier. • Köln: Einsatz von 8 Gelenkbussen (Hersteller VDL) mit konduktiver Ladung. • Weitere Projekte in Dresden, Hamburg und Münster (teilweise in Planung)

Tabelle 5: Steckbrief Nachtlader (NL)/ Overnightcharger

Kurzbeschreibung Konzept	Bus mit Elektromotor und Batterie, der nachts im Betriebshof geladen wird.
Wesentliche Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Fahrzeug:</i> Batterie (in aktuellen Projekten bis zu 300 kWh), Leistungselektronik
Zentrale Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Keine streckenseitige Infrastruktur notwendig, daher flexibler Einsatz im Netz möglich. Jedoch Einschränkungen in der Tagesfahrweite. • Energiedichte heutiger Batterien und damit realisierbare speicherbare Energiemenge limitiert Einsatz auf Linien mit wenig Energiebedarf für den Betriebstag (geringe Tagesfahrleistung, geringe Gefäßgröße)
Ausgewählte Projekte/ Planungen in Deutschland	<ul style="list-style-type: none"> • Bonn: Einsatz von sechs Solobussen (Hersteller Sileo) • München: Einsatz von zwei Solobussen (verschiedene Hersteller)

Tabelle 6: Steckbrief Brennstoffzellenhybridbus (BZ-Bus)

Kurzbeschreibung Konzept	Bus mit Elektroantrieb. Stromerzeugung im Fahrzeug durch Brennstoffzelle aus Wasserstoff. Batterie dient zur Pufferung zwischen Energieverbrauchern und Brennstoffzelle sowie zur Speicherung von Rekuperationsenergie.
Wesentliche Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Fahrzeug:</i> Brennstoffzelle, Wasserstofftank, Batterie, Leistungselektronik • <i>Infrastruktur:</i> Wasserstofftankstelle
Zentrale Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Keine streckenseitige Infrastruktur notwendig, daher flexibler Einsatz im Netz möglich • Die Verwendung von Wasserstoff erlaubt die Mitnahme hoher Energiemengen und daher den Einsatz auf energieintensiven Linien (große Fahrzeuge, anspruchsvolle Strecken) • Brennstoffzellen technisch komplex, derzeit hohe Wartungs- und Instandhaltungskosten und reduzierte Lebensdauer.
Ausgewählte Projekte/ Planungen in Deutschland	<ul style="list-style-type: none"> • Hamburg: Einsatz eines Brennstoffzellenhybrid-Solobusses (Hersteller Daimler/EvoBus) und eines batterieelektrischen Gelenkbusses mit Brennstoffzelle als Reichenweitenverlängerer (REX) (Hersteller Solaris). • Stuttgart: Einsatz von drei Brennstoffzellenhybrid-Solobussen (Hersteller Daimler/EvoBus). • Köln: Einsatz von zwei Brennstoffzellenhybrid-Gelenkbussen (Hersteller APTS) und von zwei Brennstoffzellenhybrid-Solobussen (Hersteller van Hool) • Karlsruhe: Einsatz von zwei Brennstoffzellenhybrid-Solobussen (Hersteller Daimler/EvoBus)

3.2.2 Perspektiven Technologieentwicklung

Es werden in Deutschland verschiedene technologische Pfade zur Elektrifizierung des Stadtbusverkehrs verfolgt (s.o.). Zur zukunftssicheren Gestaltung von Investitionen ist es notwendig, die Hemmnisse und Chancen der verschiedenen Elektrobustechnologien in Abhängigkeit möglicher zukünftiger Technologieentwicklungen zu betrachten. Die Einsatzmöglichkeiten und Entwicklung der Elektrobusse hängen dabei im Wesentlichen von der Batterietechnologie ab (siehe Abbildung 5). Dabei kann die Verwendung von Batterien als Energiespeicher ganz unterschiedliche Ziele haben, wie z.B.

- die Erhöhung des elektrischen Fahranteils beim Dieselhybrid,
- die Unabhängigkeit von der Fahrleitung auf einzelnen Streckenabschnitten und damit gewonnene Flexibilität bzw. niedrigere Infrastrukturkosten beim Übergang vom O- zum HO-Bus oder
- die Verringerung der Brennstoffzellen (BZ)-Leistung und Verlängerung der Lebensdauer der BZ, sowie niedrigere Endenergieverbräuche beim BZ-Batteriehybridbus.

Die in der Abbildung 5 dargestellten Pfeile drücken dabei keine Wertung in Hinsicht auf die Vorteilhaftigkeit eines Konzeptes dar, sondern die technische Darstellbarkeit der entsprechenden Konzepte im Hinblick auf die Entwicklung in der Batterietechnik.

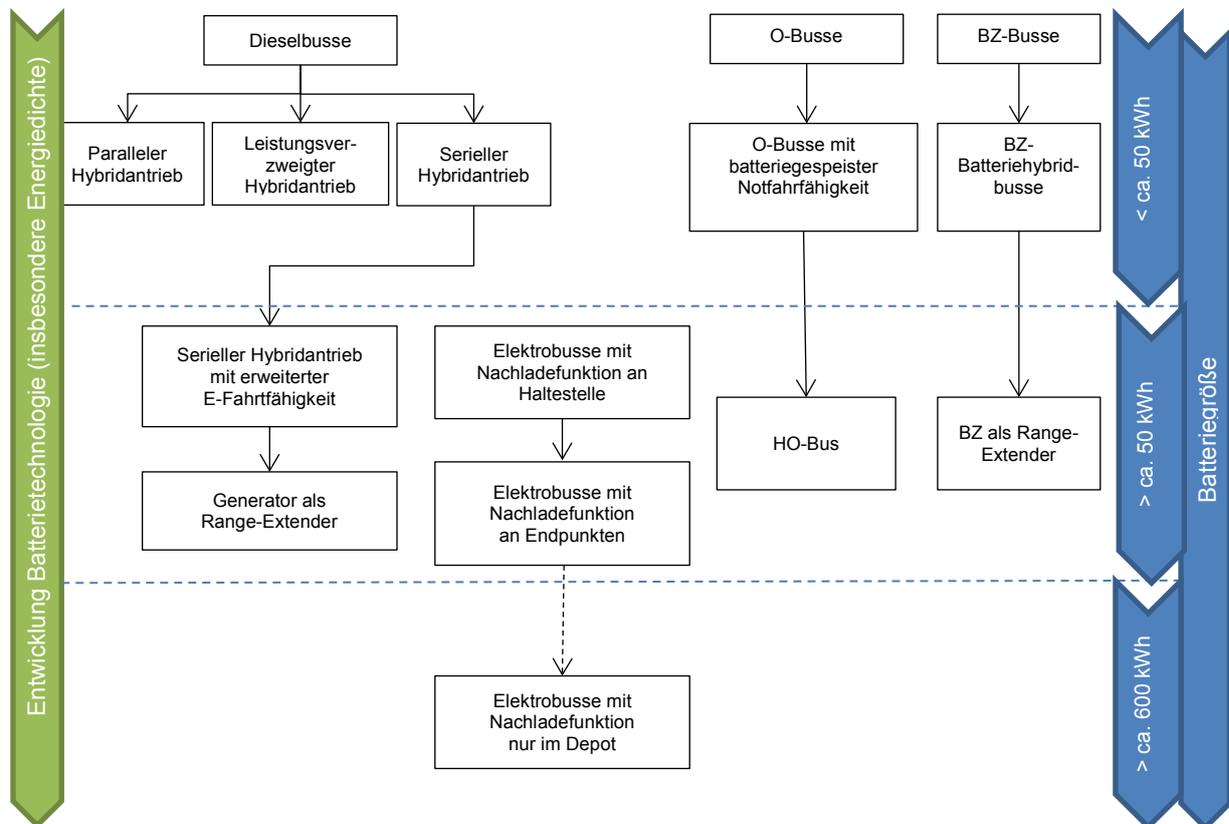


Abbildung 5: Antriebskonzepte von Linienbussen mit hohem Energiebedarf in Abhängigkeit der Batterietechnologie, aufbauend auf [VCDB, 2010]

Eine relevante Erweiterung der Energiespeicherkapazität (blaue Pfeile rechts in der Abbildung) ist dabei nur bei entsprechenden Fortschritten in der Batterietechnik möglich, was sich in den Parametern Preis, Haltbarkeit, Leistungsdichte sowie gravimetrische und volumetrischer Energiedichte ausdrückt. Bezüglich der Energiedichte haben kommerziell eingesetzte Lithium-Ionen-Systeme heute ihre physikalische Grenze nahezu erreicht, für eine deutliche Weiterentwicklung ist daher ein Wechsel zu anderen Zellchemien notwendig. [Scherr, 2015]

Aktuell werden insbesondere Lithium-Schwefel-Batterien als Alternative diskutiert. Gegenüber den heute in Nachladern zumeist eingesetzten High-Power Lithium-Ionen Batterien kann dabei theoretisch eine bis zu einer Verfünffachung der Energiedichte auf Zellebene erreicht werden, was auch den Betrieb von anspruchsvollen Linien (hohes Verkehrsaufkommen, anspruchsvolle Topographie, kalte Region) erlauben würde (siehe Abbildung 5).

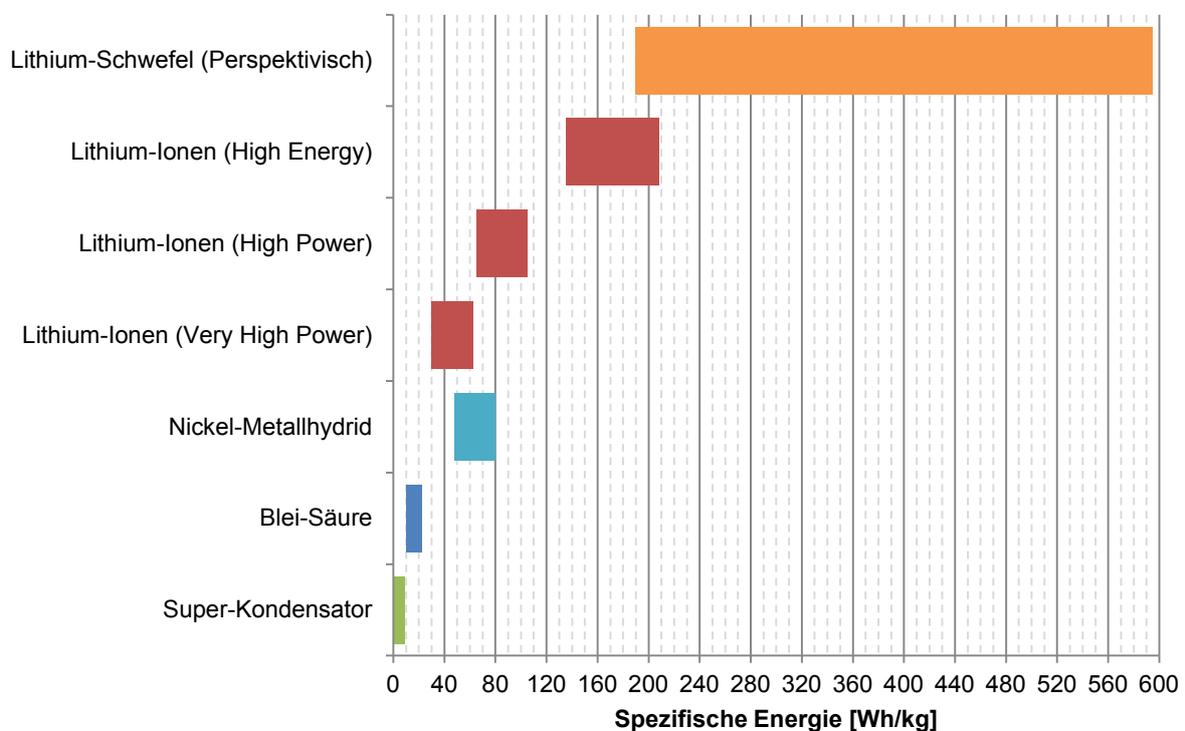


Abbildung 6: Gravimetrische Energiedichten heutiger und zukünftiger Batterietechnologien (Zellebene) [Scherr, 2015], [Schmied, et al., 2013]

Neben dem Fokus auf die Erhöhung der Energiedichte gilt es aber auch weitere Aspekte zu berücksichtigen, wie etwa Zyklenstabilität und Selbstentladung [Scherr, 2015]. Insbesondere die Zyklenstabilität ist für den Einsatz in Linienbussen von Bedeutung, die sehr viel höhere Betriebsleistungen als Pkw erbringen müssen. Daher wird die Marktreife von Lithium-Schwefel-Batterien für den Einsatz in Elektrobussen erst mit langfristiger Perspektive (frühestens im Jahr 2030) erwartet.

4 Definition des Untersuchungsfalles zum Vergleich der Konzepte

Zum Vergleich der Antriebskonzepte werden Gelenkbusse (Fahrzeuglänge 18 m) betrachtet. Diese erbringen einerseits einen hohen Anteil der Beförderungsleistung im städtischen Busbetrieb, andererseits werden sie insbesondere auf nachfragestarken Linien eingesetzt, für die der HO-Bus besonders geeignet erscheint.

Dabei wird eine für eine Stadtlinie typische Linienlänge von 15 km angenommen und das Betriebsmuster SORT 2 (standardised on-road test cycle 2) angenommen. SORT 2 entspricht einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 18 km/h und beschreibt einen städtischen Verkehr, wie er in Deutschland üblich ist („Easy urban (mixed) cycle“). Die auf der Linie eingesetzten Busse legen pro Jahr eine Strecke von 60 000 km zurück. Bezogen auf die Linie bedeutet dies, dass jeder Bus im Durchschnitt 5,5 Fahrtenpaare pro Tag (7 Fahrtenpaare pro Voll-Verkehrstag in einem Oberzentrum⁶) fährt. Es sind zur Darstellung unterschiedlicher betrieblicher Situationen Takte von 4 bis 15 Minuten in der Hauptverkehrszeit (HVZ) dargestellt. Bei der Beförderungskapazität eines 18 m Dieselmotors entspricht dies einer Linienkapazität von minimal 560 und maximal 2 100 Passagiere je Stunde und Richtung (pphd) (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Betriebliche Parameter in Abhängigkeit des Taktes

Takt [min]	4	5	6	7,5	10	15
Linienkapazität HVZ ⁷ [pphd]	2 100	1 680	1 400	1 120	840	560
Anzahl Fzg je Linie in HVZ	27	22	18	15	11	8
Umlaufzeit [min]	108	110	108	112,5	110	120
<i>davon Wendezeit je Endpunkt [min]</i>	4	5	4	6,25	5	10

Dabei wird im Standardfall eine minimale Wendezeit von 3 Minuten angenommen, so dass sich eine minimale Umlaufzeit von 106 Minuten ergibt.

4.1 Fahrzeuge

Die technischen Eigenschaften der Antriebskonzepte sind in Tabelle 8 dargestellt. Bei der Auslegung der Fahrzeuge ist zum einen auf eine möglichst vergleichbare Leistungsfähigkeit Wert gelegt worden, zum anderen erfolgt eine Orientierung an derzeit eingesetzten (Test-)Fahrzeugen. Dabei werden im Untersuchungsfall in 2015 und 2025 neu eingesetzte Fahrzeuge verglichen. Der Dieselmotors ist mit dem aktuellen Abgasstandard Euro 6 angenommen worden.

⁶ Die Anzahl Voll-Verkehrstage je Jahr bezeichnen die auf einen normalen Werktag (Mo-Fr, Schulzeit) bezogene Jahresbetriebsleistung. In [Pütz, 2010] ist sie für Ballungsräume mit 315, für Oberzentren mit 300, für Mittelzentren mit 290 und für Regionen mit 275 Tagen angegeben.

⁷ Bei 140 Plätzen je Bus

Tabelle 8: Technische Angaben zu den Antriebskonzepten, Gelenkbus, 18 m

Antriebsparameter der unterschiedlichen Antriebe		HO	GL	NL	BZ
Batteriekapazität	kWh	70	150	400	30
Leistung (Motor, Leistungselektronik)	kW	250	250	250	250
Ladeleistung (im Mittel)	kW		250	80	
Brennstoffzelle	kW				160
Wasserstoffspeicher	kg				35

Die angenommenen **Batteriekapazitäten** sind dabei Brutto-Werte, die sich aus den je nach Konzept unterschiedlich angenommenen batterieelektrischen Reichweiten sowie Entladetiefen ergeben. Eine höhere Entladetiefe führt zu einer schnelleren Alterung der Batteriezellen, so dass für Gelegenheitslader von einer geringeren Entladetiefe ausgegangen wird. Diese Antriebskonzepte haben aufgrund hoher Ladeströme heute ohnehin tendenziell Probleme mit der Lebensdauer der Batterien. Folgende Sonderfälle in Bezug auf die Batteriedimensionierung gilt es zu beachten:

- **Brennstoffzellenhybridbus:** Die Batterie dient zur Pufferung des von der Brennstoffzelle erzeugten Stroms sowie der Speicherung der Rekuperationsenergie. Ihre Größe wird im Wesentlichen von der maximal benötigten Leistungsabgabe sowie von der Betriebsstrategie der Brennstoffzelle bestimmt.
- **Nachtlader:** Die Batteriekapazität ist im Untersuchungsfall auf 400 kWh gesetzt, auch wenn für die benötigte Tagesreichweite bereits bei Annahme des Jahresmittelverbrauches für Klimatisierung und Heizung mindestens eine Kapazität von 600 kWh benötigt werden. Aufgrund des Batteriegewichtes hätte ein entsprechend dimensioniertes Fahrzeug bei heutiger Technik jedoch eine drastisch reduzierte Nutzlast und dürfte nur noch etwa 40 Fahrgäste transportieren. Der Einsatz eines Gelenkbusses erscheint damit in dieser Konfiguration nicht sinnvoll. Daher ist angenommen, dass die kleinere Batteriekapazität entweder durch den Einsatz von mehr Fahrzeugen (und damit einer Reduktion der Tagesfahrleistung je Fahrzeug bzw. das Ermöglichen einer längeren Zwischenladungen) oder durch eine Zusatzheizung kompensiert wird.

Die angenommene **Traktionsleistung** von 250 kW entspricht dem Mittel neu zugelassener Oberleitungsbusse seit dem Jahr 2000 des Marktführers Solaris (Trollino 18 m). Busse mit dieser Leistung werden u.a. in Eberswalde eingesetzt. 18 m Batteriebusse haben ähnliche Leistungen.

Die mittlere **Ladeleistung** des Nachtladers ist darauf ausgelegt, dass dieser in 5 Stunden von 10 % Restkapazität (Brutto) wieder vollgeladen werden kann. Beim Gelegenheitslader sind mit der angenommen mittleren Ladeleistung von 250 kW in 5 Minuten 21 kWh geladen, so dass bis zu einem Verbrauch von 1,4 kWh/km mit über die Linienumläufe konstanten Batterieladestand (SOC) gefahren werden könnte. Da der Verbrauch in der Regel höher ist, ist ein im Tagesverlauf abnehmender SOC oder eine längere Ladezeit einzuplanen. Für den Gelegenheitslader ist daher der Tagesenergiebedarf möglichst genau zu prognostizieren, da auf diesen aufbauend zwischen den Faktoren Verspätungsanfälligkeit, eingeschränkte Batterielebensdauer, benötigte Batteriegröße und

zusätzlichen Fahrzeugbedarf abgewogen werden muss. Dies ist u.a. in [Rogge, et al., 2015] diskutiert. Die daraus entstehenden Mehrkosten sind in Kapitel 7.4.2 über Sensitivitäten abgebildet.

4.2 Energiebereitstellungsinfrastruktur

In Tabelle 9 sind die Annahmen für die Energiebereitstellungsinfrastruktur dargestellt. Diese basieren auf einer im Rahmen der Studie durchgeführten Expertenbefragung sowie der Analyse aktueller Elektrobussysteme.

Der Anteil der Strecke, der ohne **Oberleitung** befahren wird, muss für eine konkrete Planung aus der Durchschnittsgeschwindigkeit (d.h. der Zeit) unter der Oberleitung, der Ladeleistung und -strategie der Batteriekapazität und dem Energieverbrauch bestimmt werden. Der für den Untersuchungsfall angenommene Wert von 50% Elektrifizierung entspricht dabei einem durchschnittlichen System beim derzeitigen Stand der Batterietechnik (laut Vossloh Kiepe⁸). Eine Erhöhung des oberleitungsfreien Anteils darüber hinaus ist von folgenden Aspekten abhängig:

- Optimierung der Platzierung der Oberleitung im Hinblick auf die Zeit unter der Oberleitung (insbesondere an den Endhaltestellen, aber auch an anderen Haltestellen mit längerer Aufenthaltszeit). In der Realität werden jedoch eine Vielzahl an Parametern (u.a. städtebauliche Erwägungen) die Platzierung der Oberleitungen beeinflussen.
- Bessere Batterietechnik, d.h. höhere Energie- und Leistungsdichten und geringere Kosten, machen den Einbau von größeren Batterien wirtschaftlich und praktikabel. Damit wären höhere Ladeleistungen und weitere Strecken ohne Nachladung möglich.

Im Untersuchungsfall ist auch für 2025 ein konserverativer Ansatz ohne eine Erhöhung des Anteils der oberleitungsfreien Strecke über 50 % hinaus angenommen worden.

Die **Unterwerksleistung** orientiert sich an der benötigten Ladeleistung. Eine Ausnahme stellt der Hybrid-Oberleitungsbus dar, bei dem eine Orientierung an aktuellen Oberleitungsbussystemen (Eberswalde) erfolgt [BMVI, 2015a]. Daraus ergibt sich eine im Vergleich mit anderen Elektrobussystemen höhere Unterwerksleistung. Dies ermöglicht, dass Leistungsspitzen unter Oberleitung mittels direkter Stromverwendung abgedeckt werden können und trägt damit zur Schonung der Batterie bei. Die Annahme entspricht damit der oberen Grenze des Bedarfs an Unterwerksleistung.

Zusätzliche **Ladepunkte** im Betriebshof für den HO-Bus sind als Sensitivität betrachtet worden.

⁸ Präsentation auf TrolleyMotion Konferenz, Hamburg, 17.11.2014

Tabelle 9: Annahmen Energiebereitstellungsinfrastruktur für den Untersuchungsfall (15 km Linienlänge)

	Energiebereitstellungs- infrastruktur	Auslegung	Menge/Anzahl bei 15 Bussen	Skalierung
Hybrid- Oberleitung	Oberleitungen	beidseitig	7,5 km (50% elektrifiziert)	Keine
	Unterwerke	je 750 kW	4	Keine
	Ladepunkt Betriebshof	je 10 kW	0/ 15	Anzahl Busse
Gelegenheits- lader	Schnellladepunkt inkl. Unterwerk	je 300 kW	4	Anzahl Ladepunkte, so dass Belegung < 40 %
	Ladepunkt Betriebshof	je 25 kW	15	Anzahl Busse
	Unterwerk Betriebshof	400 kW	1	Keine
Übernacht- lader	Ladepunkt Betriebshof	je 100 kW	15	Anzahl Busse
	Unterwerk Betriebshof	1,5 MW	1	Keine
Brennstoff- zelle	Wasserstofftankstelle	mittelgroße Station	25% Anteil	Keine

5 Energiebedarf der Antriebskonzepte

Der ermittelte Energieverbrauch der Antriebskonzepte berücksichtigt:

- die Verluste bei der Bereitstellung der Energie (z.B. Ladeeinrichtung etc.)
- die Verluste bei der Energiebereitstellung auf dem Fahrzeug (Laden und Entladen der Batterien, Umwandlungsverluste Leistungselektronik)
- die benötigte Energie der Elektromotoren oder Dieselmotoren zum Erbringen der Traktionsleistung und
- die Energie für den Betrieb der Nebenverbraucher (Heizung etc.).

Bei den mit Strom betriebenen Antriebskonzepten wird als Systemgrenze das öffentliche Stromnetz betrachtet, für die **Bereitstellung** der Energie am Fahrzeug sind also sowohl die Verluste des Unterwerks (soweit benötigt) und der Ladeeinrichtung berücksichtigt. Für die Diesel- und Wasserstoffbereitstellung sind keine zusätzlichen Aufwendungen berücksichtigt, die Systemgrenze ist hier das Fahrzeug.

Die benötigte **Traktionsenergie** ergibt sich aus den Fahrwiderständen, den Verlusten im Antriebsstrang und den Bremsverlusten. Letztere kann dabei bei Elektrobussen durch Rekuperation teilweise wiedergewonnen werden.

Der Energieverbrauch der **Nebenverbraucher** wird insbesondere durch den Energiebedarf für Heizung bzw. Klimatisierung bestimmt. Die restlichen Nebenverbraucher (u.a. Kneeling, Servolenkung, Beleuchtung, Fahrgastinformationssystem, Türen) haben einen untergeordneten Anteil am Verbrauch.

Bereitstellungsverluste sowohl in der Infrastruktur als auf dem Fahrzeug, Traktionsenergie, und Nebenverbraucher ohne Heizung/ Klima sind von Belicon GmbH an der HAW Landshut anhand umfangreicher Messungen an verschiedenen Bussen ermittelt worden [Pütz, / Haberstock, 2015]. Dabei mussten teilweise Ergebnisse von Solobussen auf Gelenkbusse hochskaliert werden. Aufbauend auf Aussagen von Herstellern ist dabei für die Konzepte in 2025 von folgenden Effizienzsteigerungen gegenüber 2015 ausgegangen:

- Bei dem HO-Bus, den GL und den NL durch geringere Gewichte und höhere Effizienz der Batterien und der Leistungselektronik von einer Verbesserung um etwa 10 %,
- bei Brennstoffzellenhybridbussen eine Verbesserung um 7 % und
- bei Dieseln Bussen Effizienzsteigerungen von 4 % angenommen.

Tabelle 10: Energiebedarf Gelenkbus (Bereitstellungsverluste, Traktionsenergie und Nebenverbraucher ohne Heizung/ Klima) [Pütz, / Haberstock, 2015]

Antriebskonzept		Einheit	2015	2025
Hybrid-Oberleitung	Strom	kWh/km	1,8	1,6
Gelegenheitslader	Strom	kWh/km	1,8	1,6
Übernachtlader	Strom	kWh/km	2,1	1,9
Brennstoffzelle	Wasserstoff	kWh/km	4,5	4,2
	Wasserstoff	kg/ 100 km	13,5	12,5
Diesel (inkl. Heizung/Klimatisierung)	Diesel	kWh/km	5,2	5,0
	Diesel	l/ 100 km	52	50

Energieverbrauch zur Beheizung der Elektrobusse

Der Verbrauch von Heizung bzw. Klimatisierung der Elektrobusse konnte nicht über Messungen ermittelt werden, da dies umfangreiche Testreihen bei verschiedenen klimatischen Bedingungen erfordert hätte. Zudem war ein Großteil der gemessenen Fahrzeuge mit chemischen Zusatzheizungen ausgestattet, die im Untersuchungsfall nicht betrachtet werden. Daher sind die Verbräuche für Heizung/ Klimatisierung modelliert worden.

Um die Witterungsverhältnisse im Jahresverlauf in der Modellierung darzustellen werden die Testreferenzjahre (TRY) 2011 des Deutschen Wetterdienstes⁹ für mittlere Witterungsverhältnisse herangezogen. Diese sind speziell zusammengestellte Datensätze, die für jede Stunde eines Jahres

⁹ Hyperlink: http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/spez_themen/try/try_node.html

verschiedene meteorologische Daten, wie Luftfeuchte, Temperatur oder solare Einstrahlung, enthalten. Solche Datensätze werden vor allem für Simulationen und Berechnungen in der Heizungs- und Raumluftechnik genutzt und sollen einen typischen mittleren Witterungsverlauf im Jahresgang repräsentieren.

Der Heizleistungsbedarf eines Omnibusses liegt gemäß der Firma Spheros [Basile, 2013] bei -20 °C Außentemperatur um die 22 kW und kann bei höheren Frischluftanteilen bis zu knapp 30 kW betragen. Um die Heizlast effizient zu decken, können Wärmepumpen eingesetzt werden. Diese können durch Nutzung der Umweltwärme die notwendige Heizenergie um bis zu 70 % reduzieren. Bei niedrigen Temperaturen sinkt die Leistungszahl (COP) und liegt nach [Basile, 2013] bei 0°C Verdampfungstemperatur in etwa knapp unter 2,5. Zudem beginnt ab niedrigeren Außentemperaturen von rund 7° C der Wärmetauscher zu vereisen, wodurch der COP weiterhin abnimmt und nur mit einer gezielten Enteisungsstrategie ein effektiver und effizienter Wärmepumpenbetrieb aufrechterhalten werden kann [Rieberer, 2015]. Fällt die Effizienz aufgrund der aufzuwendenden Enteisungsenergie unterhalb der des elektrischen Heizgerätes (PTC), ist ein weiterer Betrieb der Wärmepumpe nicht sinnvoll.

Zur Abschätzung des Jahresenergieverbrauchs der Beheizung des Busses wird davon ausgegangen, dass der Bus während der nächtlichen Betriebspause von ca. fünf Stunden vorkonditioniert wird und daher nicht zu Beginn des Betriebs aufgeheizt werden muss.

Wie in Tabelle 11 erkennbar, beträgt der über die Klimaregionen gemittelte Energieverbrauch eines Elektrobusses bei mittlerem Frischluftanteil schätzungsweise 18,4 MWh im Jahr. In den kältesten Klimaregionen Deutschlands, wie z.B. dem Erzgebirge, kann der Energieverbrauch unter sonst gleichen Annahmen bis zu 32,3 MWh betragen. In den wärmsten Regionen, wie z.B. dem Oberrheingraben beläuft sich die benötigte elektrische Energie auf circa 15,2 MWh.

Tabelle 11: Jahresenergieverbräuche zum Beheizen eines Gelenkbusses mit Elektroantrieb im Betrieb von 5:00 Uhr bis 23:00 Uhr, eigene Berechnungen

Region	Heizenergieverbrauch			Mittlerer spezifischer Heizenergieverbrauch
	Basis	ohne Frischluft	maximaler Frischluftanteil	Basis
Mittel der Stundenwerte aller Klimaregionen	18 400 kWh	15 400 kWh	24 300 kWh	0,31 kWh/km
Kälteste Klimaregion en	32 300 kWh	26 900 kWh	42 400 kWh	0,54 kWh/km
Wärmste Klimaregionen	15 200 kWh	12 700 kWh	20 100 kWh	0,25 kWh/km

In Abbildung 7 ist erkennbar, dass in den Wintermonaten der durchschnittliche elektrische Energieverbrauch zum Heizen je nach Klimaregion zwischen 2,2 MWh monatlich in der wärmsten Klimaregion und 4,7 MWh monatlich in der kältesten Klimaregion betragen kann. Auch die maximale elektrische Leistungsaufnahme auf Basis der stündlichen Temperaturmittelwerte variiert in diesem Zeitraum in etwa zwischen 6 kW in der wärmsten Klimaregion und 22 kW in der kältesten Klimaregion.

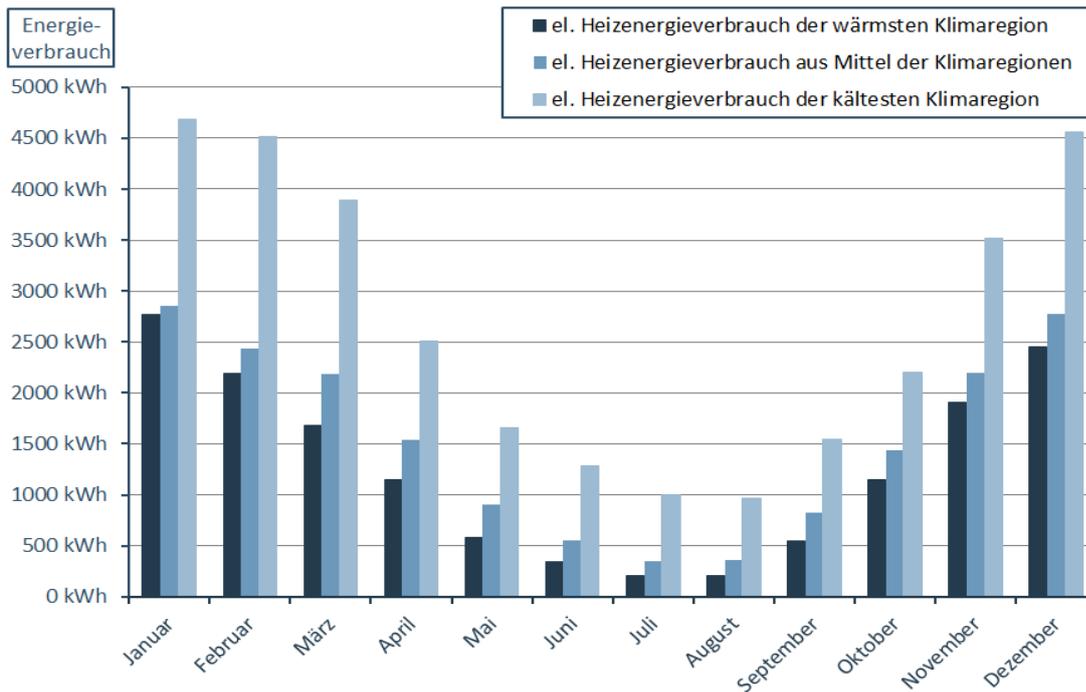


Abbildung 7: Abschätzung der monatlichen elektrischen Energieverbräuche zum Beheizen eines Elektrobusses in Deutschland.

Gemäß [Sonnekalb, 2006] liegt die Empfehlung für die Solltemperatur im Kühlbetrieb bei 25 °C für Reisebusse und bei 3 K unter der Außentemperatur für Stadtlinienbusse. In der wärmsten Klimaregion ergeben sich damit als Maximalwert etwa 2,2 MWh pro Jahr elektrischer Energie zum Kühlen. Der Median der benötigten jährlichen elektrischen Energie liegt über alle Klimaregionen hinweg unter einer MWh (ca. 0,01 kWh je km im Jahresmittel) und damit unter den gegebenen Unsicherheiten in einer zu vernachlässigbaren Größenordnung. Im Folgenden wird der Energiebedarf zum Kühlen daher nicht weiter berücksichtigt.

6 Umweltwirkungen der Antriebskonzepte

6.1 Methodik zum Vergleich der Emissionen und des Energieverbrauches

Grundlage für den Vergleich der Umweltwirkungen sind detaillierte Ökobilanzen. Wichtige Randbedingungen der Ökobilanzen sind dabei die funktionelle Einheit, die Bilanzgrenzen und die berücksichtigten Umweltwirkungen, die in diesem Abschnitt kurz dargestellt werden.

6.1.1 Funktionelle Einheit

Die Umweltwirkungen werden auf den Nutzen bezogen, der durch eine funktionelle Einheit möglichst vergleichbar quantifiziert wird. Analog zu dem in den vorherigen Kapiteln betrachteten Untersuchungsraum ist in dieser Umweltbilanz die funktionelle Einheit als ein mit einem *Gelenkbus erbrachter Kilometer (Bus-km) im Linienbetrieb* definiert. Daneben wird ein Ausblick auf den Vergleich je Beförderungskapazität (Platz-km) gegeben.

Von diesen funktionellen Einheiten wird abgewichen, wenn Teilbereiche der Fahrzeuge oder der Energiebereitstellungsinfrastruktur verglichen werden, z.B. wird dann auf die Batteriegröße (kWh) zurückgegriffen.

6.1.2 Lebenswegabschnitte, Bilanzgrenzen und Datengrundlagen

Für den Vergleich der Umweltwirkungen werden alle relevanten Lebenswegabschnitte für die Erbringung der betrachteten Leistung (Funktionelle Einheit Bus-km) betrachtet:

- Zur **Herstellung** von Fahrzeugen und Batterien sind detaillierte Informationen zum Materialeinsatz für die Fahrzeuge sowie den mit deren Produktion zusammenhängendem Energie- und Transportaufwand hinterlegt. Eine Differenzierung nach Bauteilen erlaubt die individuelle Bilanzierung von Fahrzeugen mit verschiedenen Antriebskonzepten.
- Die **direkten Emissionen** während der Nutzung (Auspuffemissionen der Dieselsebusse) entstammen dem Handbuch für Emissionsfaktoren (Version 3.2).
- Basierend auf den in Kapitel 5 ermittelten Energiebedarfen der Antriebskonzepte werden zusammen mit den Daten von LBST die Vorkettenemissionen für die **Strom- und Kraftstoffbereitstellung** berechnet. Bei den Kraftstoffen werden neben fossilem Otto- und Dieselmotorkraftstoff auch Biokraftstoffe als Beimischung oder Reinkraftstoff berücksichtigt (siehe Kapitel 6.3).

Als weitere Bilanzgrenzen werden für den Vergleich der Umweltwirkungen angenommen:

- Der geographische Bezugsrahmen ist in der Regel Deutschland.
- Zeitlich wird sowohl der aktuelle Stand der Technik (2015), als auch ein Szenario mit im Jahr 2025 neu eingesetzten Bussen betrachtet. Die Umweltwirkungen des Betriebes der 2025 neu eingesetzten Busse werden dabei bis zu ihrer Außerbetriebsetzung im Jahr 2045 betrachtet.

6.1.3 Berücksichtigte Umweltwirkungen

Zur Bewertung der Umweltwirkungen der verschiedenen Antriebstechnologien werden folgende Emissionen betrachtet:

- Die Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffmonoxid (N₂O). Diese tragen zum globalen Treibhauseffekt bei und werden in ihrer Wirkung mittels des Global Warming Potentials (GWP) dargestellt. Das GWP beschreibt dabei die THG-Wirkung der Gase in dem Zeitraum von 100 Jahren nach ihrer Emission in Bezug auf die Emission der gleichen Menge CO₂. Die verwendeten Berechnungsfaktoren entstammen dabei aus [IPCC, 2007]. Einheit der so berechneten THG-Wirkung sind CO₂-Äquivalente (CO₂-Äq).
- Die in der derzeitigen Abgasregulierung wesentlichen Luftschadstoffe Partikelmasse (Feinstaub, PM₁₀) und Stickstoffdioxid (NO₂, bzw. zusammen mit Stickstoffmonoxid (NO) auch als NO_x geführt). Diese tragen zur lokalen Luftverschmutzung bei und sind insbesondere in den Städten für Gesundheitsbelastungen verantwortlich. Zudem tragen Stickoxide auch zur Eutrophierung und Versauerung bei.

6.2 Direkte Emissionen in der Nutzung

6.2.1 Luftschadstoffe und THG-Emissionen

Während Elektrobusse lokal keine Schadstoffe emittieren, belasten Dieselabgase die Umgebungsluft und emittieren Treibhausgase. Die Werte für PM₁₀ und NO_x von Dieselnissen der aktuellen Emissionsfaktoren der Stufe Euro 6 entstammen TREMOD¹⁰ in der Version 5.53. Diese bauen auf der Version 3.2 des „Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr“ (HBEFA)¹¹ auf (siehe Tabelle 12). Die THG-Emissionen der Dieselnisse leiten sich aus dem Energieverbrauch der Busse (siehe Kapitel 5) und dem Emissionsfaktor für Diesel (266 g/kWh [ifeu, 2014]) ab.

Tabelle 12: Direkte Emissionen Luftschadstoffe und THG von 18m-Dieselnissen [g/ Bus-km]

Jahr	CO ₂ -äq.	NO _x	PM ₁₀
2015	1373,6	0,37	0,01
2025	1320,8		

Für die Partikelmasse decken sich die Werte aus HBEFA gut mit ersten (indikativen) durchgeführten PEMS-Messungen¹² im „Realbetrieb“ und sind insgesamt auf sehr niedrigem Niveau. PEMS-Messungen der NO_x-Emissionen zeigen dagegen eine Erhöhung der Emissionen gegenüber den HBEFA-Werten auf einzelnen Linien um bis zu den Faktor 6 [TNO, 2014]. Insgesamt existieren bisher wenige Messungen mit Euro 6-Bussen, zudem sind die einzelnen Messungen schwer zu reproduzieren.

6.2.2 Exkurs Lärm

In dem für Stadtbusse relevanten Geschwindigkeitsbereich (bis etwa 50 km/h [UBA, 2013]) dominieren die Geräusche des Antriebs gegenüber den Rollgeräuschen. Elektroantriebe sowie die zugehörige Leistungselektronik sind aber wesentlich leiser als Verbrennungsmotoren, daher können Elektrobusse zur Lärminderung im Innenstadtbereich beitragen. Messungen der Lärmmissionen bei Vorbeifahrt von Diesel- und Elektrobusen ergeben dabei eine Reduktion von bis zu 5 dB(A) [Pütz, / Haberstock, 2015], also subjektiv mehr als eine Halbierung der Lärmbelastung.

Dies ist insofern relevant, als das etwa 13 Millionen Bürger in Deutschland Pegeln von 65 dB(A) tagsüber bzw. 55 dB(A) nachts ausgesetzt sind, die potentiell eine Gesundheitsbelastung darstellen [UBA, 2013]. Zudem verpflichtet die EU mit der „Umgebungslärmrichtlinie“ (2002/49/EG) die Mitgliedsländer Belastungen durch Umgebungslärm zu erfassen und darauf aufbauend Lärmaktionspläne – bei denen der Einsatz von Elektrobusen eine mögliche Maßnahme darstellen kann - zu erstellen, wenn Grenzwerte überschritten werden. Diese Grenzwerte unterscheiden dabei zwischen verschiedenen Nutzungsformen (z.B. Krankenhäuser, Wohngebiete, Mischgebiete,

¹⁰ Transport Emission Model: Ein vom ifeu im Auftrag des Bundesumweltamtes entwickeltes Modell zur Berechnung des Energieverbrauchs, der Verkehrs- und Fahrleistung sowie der THG- und Luftschadstoffemissionen des Verkehrs, siehe [ifeu, 2014]

¹¹ <http://www.hbefa.net/d/> (zuletzt abgerufen am 4.12.2015)

¹² Portable Emission Measurement System

Gewerbegebiete) und zwischen der Belastung am Tag und in der Nacht. Ein Rechtsanspruch auf Einhaltung dieser Werte gilt jedoch nur bei Neubau oder bei einem grundlegenden Eingriff in die Straße [MVI Baden-Württemberg, 2014].

6.3 Emissionen der Strom- und Kraftstoffbereitstellung

6.3.1 Dieselkraftstoff

Die Bereitstellung von Dieselkraftstoff erfolgt auf Basis eines Mixes primär aus konventionellem Rohöl, unkonventionellem Rohöl sowie aus Kohle (Coal-to-Liquid) und Erdgas (Gas-to-Liquid).

Die Treibhausgasemissionen aus der Bereitstellung von Dieselkraftstoff aus konventionellem Rohöl, über Coal-to-Liquid und über Gas-to-Liquid wurden aus [JEC, 2014] entnommen. Die Emissionen aus der Bereitstellung von Dieselkraftstoff aus Ölsanden wurden auf Basis von [Öko-Institut, 2009] berechnet. Für Ölschiefer wurde auf Daten der Förderung und Verarbeitung von Ölschiefer in Estland in [Gavrilova, et al., 2010], [Kuusik, 2012] und [Sabanov, Sokman, 2008] zurückgegriffen sowie auf Daten in [Brandt, 2009] (Minenbetrieb), [Quian, Wang, 2006] (Stromverbrauch Galoter-Prozess) und [Öko-Institut, 2011] (Schadstoffemissionen aus Verbrennungsprozessen in der Anlage). Tabelle 13 zeigt die Emissionen aus der Bereitstellung von Dieselkraftstoff für unterschiedliche Kraftstoffbereitstellungspfade.

Tabelle 13: Emissionen aus der Bereitstellung von Dieselkraftstoff über unterschiedliche Bereitstellungspfade

Rohstoffquelle	CO ₂ - Äquivalente [g/kWh]	Stickoxide [g/kWh]	Staub/Partikel [g/kWh]
Konventionelles Rohöl	55,1	0,138	0,005
Teersand	115,3	0,262	0,006
Ölschiefer	243,8	0,137	0,251
Kohle (Coal-to-Liquid)	469,6	0,311	0,037
Erdgas (Gas-to-Liquid)	84,2	0,219	0,007

Die Anteile wurden aus [International Energy Agency, 2013] abgeleitet. Tabelle 14 zeigt die Anteile der für die Bereitstellung von Dieselkraftstoff eingesetzten Rohstoffquellen.

Tabelle 14: Herkunft des Dieselkraftstoffs

Rohstoffquelle	2015	2025
Konventionelles Rohöl	97,6%	94,4%
Teersand	1,6%	3,5%
Ölschiefer	0,4%	0,8%
Kohle (Coal-to-Liquid)	0,2%	0,7%
Erdgas (Gas-to-Liquid)	0,2%	0,5%

Tabelle 15 zeigt die Emission von Treibhausgasen und Schadstoffen für die Bereitstellung von Dieselkraftstoff heute (2015) und 2025.

Tabelle 15: Emissionen aus der Bereitstellung von Dieselkraftstoff

Jahr	CO ₂ - Äquivalente [g/kWh]	Stickoxide [g/kWh]	Staub/Partikel [g/kWh]
Mix 2015	57,8	0,141	0,006
Mix 2025	62,0	0,144	0,008

6.3.2 Wasserstoff

Der komprimierte Wasserstoff (CGH₂) wird aus einem Mix von Erdgasdampfreformierung und Elektrolyse mit erneuerbarem Strom bereitgestellt. In beiden Fällen wird der Wasserstoff vor Ort an der Tankstelle produziert.

Im Fall von Wasserstoff aus Erdgasdampfreformierung wird der Strom für den Betrieb von Hilfsaggregaten wie Kompressoren, Lüftern und Steuerung für die Reformieranlage sowie für den Betrieb der CGH₂-Tankstelle aus dem Stromnetz (Niederspannungsebene) bezogen. Die Zusammensetzung des Strommixes entspricht der Zusammensetzung für den Einsatz von batterieelektrischen Bussen (siehe unten). Die Tankstelle ist für die Befüllung von Fahrzeugtanks mit einem maximalen Druck von 35 MPa ausgelegt. Das Erdgas für die Dampfreformierung wird analog zu [JEC, 2014] von den Erdgasfeldern über eine Entfernung von 4.000 km in die EU transportiert und von dort über eine Entfernung von 500 km und über das lokale Erdgasnetz zur Tankstelle transportiert. Die Daten für die Dampfreformieranlage in Tabelle 16 basieren auf einem Kompaktreformer des U.S.-amerikanischen Herstellers H2Gen [H2Gen, 2007] (inzwischen von Air Liquide übernommen).

Tabelle 16: Dampfreformieranlage zur Produktion von Wasserstoff vor Ort an der Tankstelle

Input	Einheit	Wert
Erdgas	kWh/kWh _{H2}	1,45
Strom	kWh/kWh _{H2}	0,094
N ₂	kg/kWh _{H2}	0,043

Im Fall von Wasserstoff aus Wasserelektrolyse wird erneuerbarer Strom eingesetzt, der auch einen Großteil des Strombedarfs der CGH₂-Tankstelle deckt. Ein kleinerer Teil des Strombedarfs (für den Betrieb des Sekundärkompressors zur Befüllung des stationären Hochdruckpufferspeichers und der Busse) wird aus dem deutschen Strommix gedeckt. Der Wirkungsgrad der Elektrolyseanlage inklusive Feinreinigung des Wasserstoffs liegt bei etwa 60% bezogen auf den unteren Heizwert (entspricht einem Stromverbrauch von etwa 5 kWh pro Nm³ Wasserstoff). Bei Wasserstoff aus Wasserelektrolyse ist die CGH₂-Tankstelle inklusive des Elektrolyseurs an das Mittelspannungsnetz angeschlossen.

Der Stromverbrauch der CGH₂-Tankstelle beträgt bei beiden Pfaden etwa 0,09 kWh pro kWh Wasserstoff bezogen auf den unteren Heizwert.

Tabelle 17: Emissionen aus der Bereitstellung CGH₂ über unterschiedliche Bereitstellungspfade

Rohstoffquelle	CO ₂ - Äquivalente [g/kWh]	Stickoxide [g/kWh]	Staub/Partikel [g/kWh]
2015: Erdgas (Dampfreformierung)	472,7	0,404	0,035
2015: Elektrolyse (erneuerbarer Strom)	13,3	0,013	0,001
2025: Erdgas (Dampfreformierung)	425,8	0,339	0,021
2025: Elektrolyse (erneuerbarer Strom)	7,6	0,010	0,002

Die Erzeugung von „grünem“ Wasserstoff und seine Distribution ist eine wichtige Zielvorgabe der CEP. Mindestens die Hälfte des Wasserstoffs an CEP-Tankstellen soll aus erneuerbaren Energiequellen stammen [Schnell, Retzke, 2010]. Daher wurde angenommen, dass ab 2020 mindestens 50% des Wasserstoffs aus Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt wird.

Tabelle 18: Herkunft des Wasserstoffs

Rohstoffquelle	2015	2025
Erdgas	80%	40%
Erneuerbarer Strom	20%	60%

Aus den Emissionen der einzelnen Bereitstellungspfade in Tabelle 17 und den Anteilen in Tabelle 18 ergeben sich die in Tabelle 19 angegebenen Emissionen für die Bereitstellung von Wasserstoff aus dem Wasserstoffmix.

Tabelle 19: Emissionen für die Bereitstellung von komprimierten Wasserstoff (CGH₂)

Jahr	CO ₂ - Äquivalente [g/kWh]	Stickoxide [g/kWh]	Staub/Partikel [g/kWh]
Mix 2015	380,8	0,326	0,028
Mix 2025	174,9	0,142	0,010

6.3.3 Strom

Es wurden Szenarien für die Entwicklung Kraftparkes erstellt. Der Strommix und die daraus resultierenden Emissionen für 2015 basieren auf Angaben in [AG Energiebilanzen, 2015], [Bundesverband Erneuerbare Energien, 2015] und [Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, 2015], die auf das Gesamtjahr hochgerechnet wurden. Die Werte ab 2020 basieren auf [DLR, et al., 2012] (Szenario 2011 A). Die Emissionen beinhalten die Emissionen aus den Kraftwerken selbst und die Emissionen aus der Bereitstellung der eingesetzten Energieträger Kohle, Erdgas, Öl und Biomasse. Folgende in Tabelle 20 gezeigten Emissionen werden für den Strommix heute (2015) und im Jahr 2025 angesetzt.

Tabelle 20: Emissionen für Strom (Mittelspannung) in Deutschland

Jahr	CO ₂ - Äquivalente [g/kWh]	Stickoxide [g/kWh]	Staub/Partikel [g/kWh]
Mix 2015	583,6	0,623	0,159
Mix 2025	354,7	0,441	0,083

6.4 Emissionen bei der Herstellung von Fahrzeugen und Energiebereitstellungsinfrastruktur

Zur Betrachtung der Umweltwirkungen einer Technologie gehören neben den bereits beschriebenen direkten Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung und den indirekten Emissionen aus der Strom- bzw. Kraftstoffbereitstellung auch die Aufwendungen für die Herstellung und Entsorgung der Fahrzeuge sowie der benötigten Infrastruktur. In diesem Kapitel wird die zur Bestimmung der Umweltwirkungen notwendige ökobilanzielle Modellierung der Buserstellung und der Infrastruktur für die unterschiedlichen Antriebskonzepte der Busse beschrieben.

6.4.1 Buserstellung

Zur Bestimmung der Umweltwirkungen der Buserstellung ist am ifeu ein Ökobilanzmodell für Busse mit unterschiedlichen Antriebstechnologien entwickelt worden. Für den Vergleich der Technologien ist dafür der Bus in seine wesentlichen Komponenten zerlegt worden, wie in Abbildung 8 dargestellt.

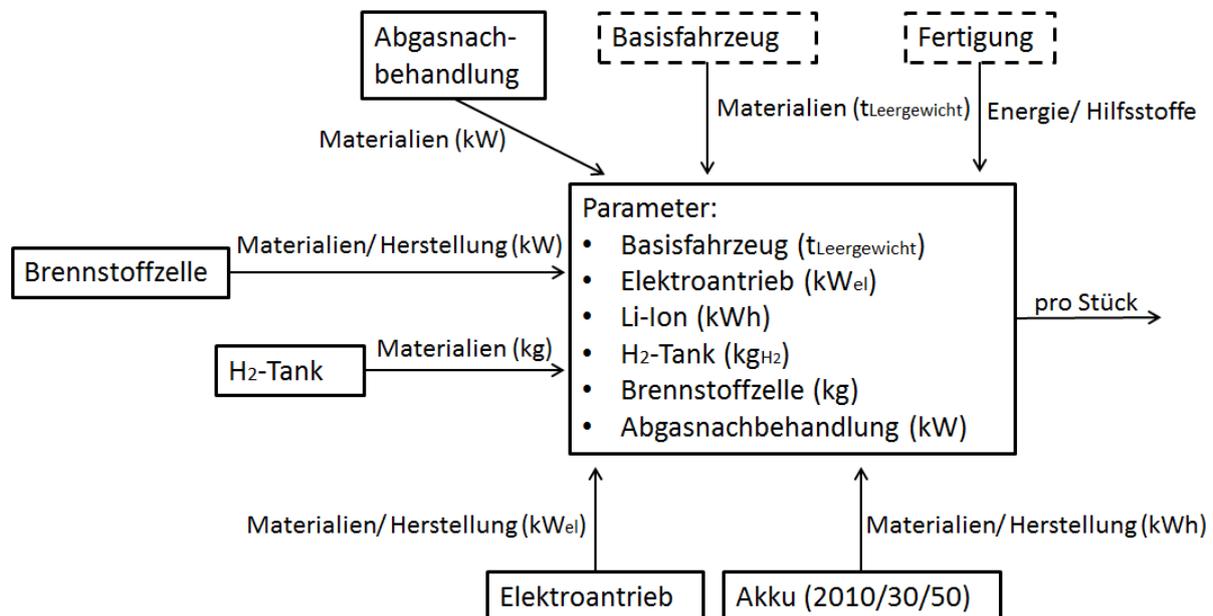


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Ökobilanzmodells für die Buserstellung

Die Hintergrunddaten zu Materialvorketten werden aus der ecoinvent Datenbank (Version 3.1) übernommen (globaler bzw. europäischer Marktmix und Systemmodell „cut-off“). Alle untersuchten Busse sind 18 Meter lange Gelenkbusse mit einem Leergewicht von 17,2 t (ohne Batterie bzw. Brennstoffzelle). Die Auslegung der Fahrzeuge bezüglich der Komponentengröße entspricht der

Festlegung in Kapitel 4.1., wobei folgende Leistungs- bzw. Energiedichten für die Brennstoffzelle bzw. Batterien angenommen sind:

Tabelle 21: Angenommene Leistungsdichte der Brennstoffzelle und Energiedichten der Batterien in 2015 und 2025

Typ	eingesetzt in Fahrzeugkonzepte	Leistungs- bzw. Energiedichte (Systemebene)	
		2015	2025
Batterie „Hochleistung“	HO, GL, BZ	67,5 Wh/kg	97,5 Wh/kg
Batterie „Hochenergie“	NL	72,5 Wh/kg	102,5 Wh/kg
Brennstoffzelle	BZ	400 W/kg	650 W/kg

Zur Bilanzierung der Batteriebusse- sowie des HO-Busses wird der Bus-Basisdatensatz kombiniert mit einem Elektromotor und einem Li-Ionen Akku. Für den Brennstoffzellenhybridbus werden zusätzlich der Wasserstofftank und die Brennstoffzelle bilanziert (siehe Anhang). Dabei halten alle Komponenten außer der Brennstoffzelle und dem Li-Ionen Akku die gesamte Fahrzeuglebensdauer (12 Jahre) lang. Der Li-Ionen Akku wird alle 5 Jahre ersetzt, die Brennstoffzelle im dritten, sechsten und zehnten Jahr nach der Neuzulassung. Für den Austausch werden jeweils die verbesserten Komponenten (Stand 2025) verwendet.

6.4.2 Energiebereitstellungsinfrastruktur

Für die unterschiedlichen Bustypen werden unterschiedliche Infrastrukturkomponenten benötigt wie z.B. die (Schnell-)Ladestationen für die batterieelektrischen Busse, die Wasserstofftankstellen für die Brennstoffzellenhybridbusse und die Oberleitungen (inklusive Stromversorgung) für die Oberleitungsbusse (siehe Kapitel 4.2). Die Datenlage für diese Infrastruktur ist dabei für eine detaillierte Umweltbilanz unzureichend, so dass hier lediglich eine grobe Einschätzung der Emissionen der Infrastrukturherstellung sowie eine Einordnung in die Gesamtemissionen der Bussysteme gegeben werden kann. Die Umweltwirkungen sind dabei in Tabelle 22 dargestellt, das Vorgehen zur Ableitung dieser Werte im Anhang.

Tabelle 22: Umweltwirkungen der Infrastruktur je Buskilometer im Untersuchungsfall, 7,5 Minuten-Takt

Infrastruktur	CO _{2äq} [g/km]	NO _x [mg/km]	PM ₁₀ [mg/km]
Oberleitungen inklusive Masten	28	13	8
Unterwerke	22		
Wasserstofftankstelle	73	171	279
Dieseltankstelle	<1	<1	<1

Die Werte liegen dabei in der Größenordnung der Unsicherheiten der Ökobilanz, zudem sind sie selbst von hohen Unsicherheiten geprägt. Daher werden die Emissionen der Infrastrukturherstellung in den Ergebnissen je Bus-km (Kapitel 6.5) lediglich qualitative berücksichtigt.

6.5 Ergebnisse der Umweltbilanzen

6.5.1 Emissionen der Buserstellung

Für die Auswertung der Umweltwirkungen der Buserstellung werden diese in die Bereiche

- Basisfahrzeug inklusive Herstellung, Abgasnachbehandlung und (Elektro)antrieb,
- Brennstoffzelle und den Wasserstofftank sowie
- Akkus

unterteilt. Die Treibhausgasemissionen der Buserstellung im Jahr 2015 zeigt Abbildung 9.

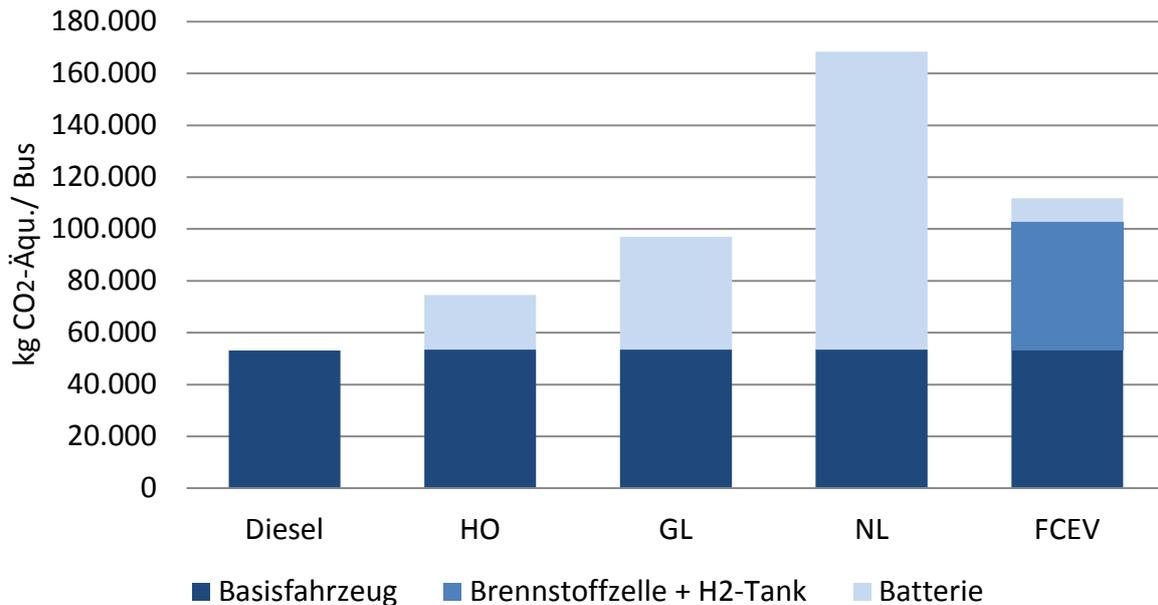


Abbildung 9: Treibhausgasemissionen bei der Herstellung eines Busses im Jahr 2015

Zunächst zeigt sich, dass alle alternativen Antriebskonzepte zu einer Erhöhung der Emissionen in der Herstellungsphase führen. Dabei spielt besonders die Größe der verwendeten Akkus eine Rolle. Der hohe Einfluss des Wasserstofftanks und der Brennstoffzelle sind hauptsächlich auf das im Tank verwendete CFK und den Katalysator der Brennstoffzelle, Platin, zurückzuführen. Effizientere Fertigungsverfahren für CFK (hier nicht betrachtet), die Verwendung von Strom mit einem höheren Anteil erneuerbarer Energie sowie ein höherer Recyclinganteil beim Platin (ebenfalls in dieser Studie nicht betrachtet) könnten diese Umweltlasten in Zukunft senken.

Ähnliches gilt auch für die Stickoxid- und Partikelemissionen in Abbildung 10. Auch hier zeigt sich der Einfluss der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks sowie der Batteriegröße deutlich.

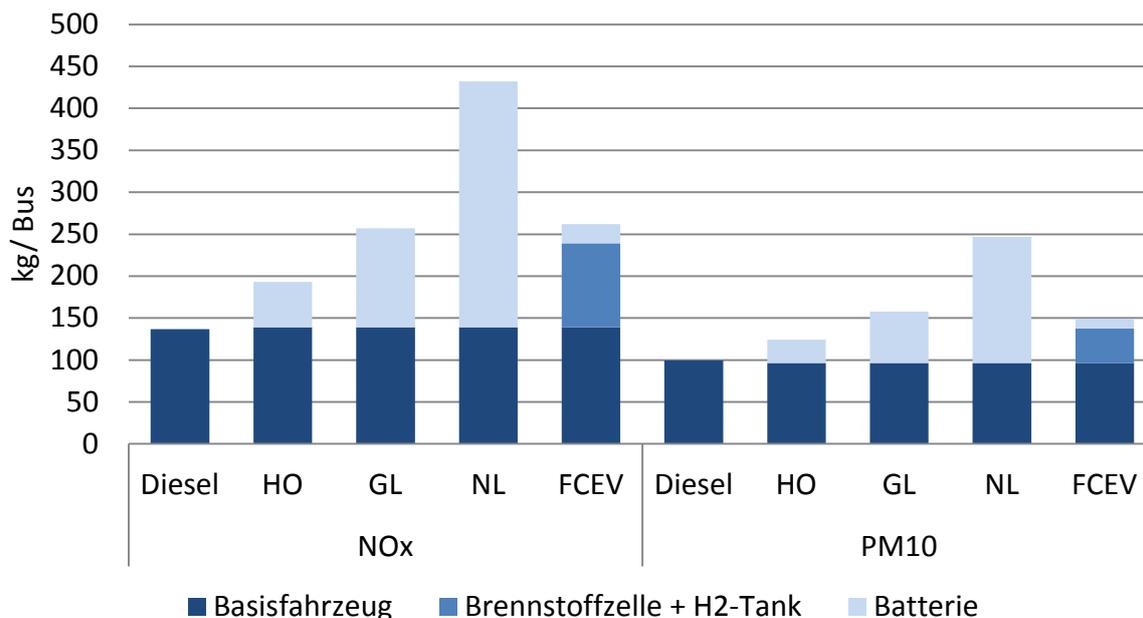


Abbildung 10: Stickoxid- und Partikelemissionen bei der Herstellung eines Busses im Jahr 2015

6.5.2 Emissionen pro Buskilometer (Herstellung und Betrieb)

Im vorherigen Kapitel wurde gezeigt, dass sowohl die Treibhausgasemissionen als auch die Partikel- und Stickoxidemissionen bei der Fahrzeugherstellung von Elektrobussystemen höher als beim Dieselbus liegen. In der Gesamtbetrachtung werden nun auch die direkten Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung sowie die Vorkettenemissionen der Strom- und Kraftstoffbereitstellung (beschrieben in den Kapiteln 6.2 und 6.3) berücksichtigt.

Dabei wird für jede Emissionskategorie ermittelt, welche Umweltlasten aus Fertigung, Wartung (Ersatzbatterien und Brennstoffzellen) und Entsorgung umgelegt auf die Lebensfahrleistung der Busse von 720 000 km pro Buskilometer anfallen. Bei den Emissionen aus der Strom- und Dieselbereitstellung werden jeweils einerseits der Wert im Jahr der Erstzulassung (Jahre 2015 oder 2025), und andererseits der Wert gemittelt über die Lebensdauer der Busse angegeben. Damit soll gezeigt werden, dass z.B. ein heute gekaufter Elektrobuss bei einer kontinuierlichen Verbesserung des Strommixes über seine Lebensdauer hinweg mit sinkenden Umweltlasten rechnen kann.

Es zeigt sich, dass bei den elektrifizierten Buskonzepten eine Verschiebung der Emissionen von den direkten (Verbrennungs-)Emissionen zu den Emissionen aus der Vorkette und in die Herstellungsphase erfolgt.

Treibhausgase

Im Bereich der Treibhausgase, gezeigt in Abbildung 11, schneiden alle elektrifizierten Konzepte besser ab als der Dieselbus. Die geringsten Umweltlasten haben dabei der HO-Bus und der Gelegenheitslader, deutlich höhere der Brennstoffzellenhybridbus. Je größer der verwendete Akku ist, desto höher werden die Treibhausgasemissionen. Allerdings fehlen beim Gelegenheitslader und beim HO-Bus die Aufwendungen für die Infrastruktur. Liegt der Wert für diese Infrastruktur etwa in der

Größenordnung wie in Tabelle 22 gezeigt, d.h. bei ca. 40-80 g CO_{2-äq}/Bus-km für die Busse mit elektrischen Antrieb (beim Dieselbus < 1 g CO_{2-äq}/Bus-km) ändert sie jedoch nichts am THG-Vorteil von HO-Bus und GL gegenüber den verglichenen Buskonzepten.

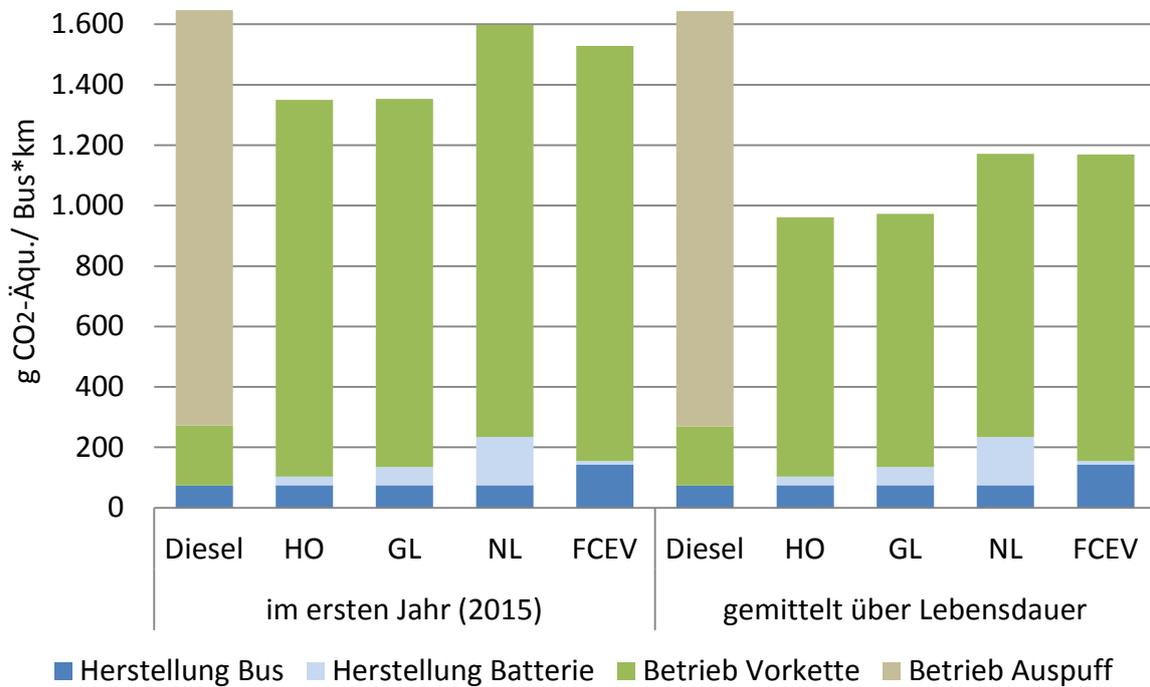


Abbildung 11: Treibhausgaseffekt der verschiedenen Antriebskonzepte (NZL 2015)

Im Vergleich von Abbildung 11 und Abbildung 12 ist zu sehen, dass in 2025 alle elektrifizierten Konzepte ihren Vorsprung gegenüber dem Dieselbus deutlich ausbauen. Dies liegt zum einen an den verbesserten Komponenten (Batterien und Brennstoffzelle), aber vor allem an der verstärkten Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien. Der Dieselbus verzeichnet einen leichten Anstieg bei den THG-Emissionen da die Emissionen in der Vorkette (WtT) leicht ansteigen und nicht durch eine effizientere Kraftstoffnutzung (TtW) kompensiert werden können.

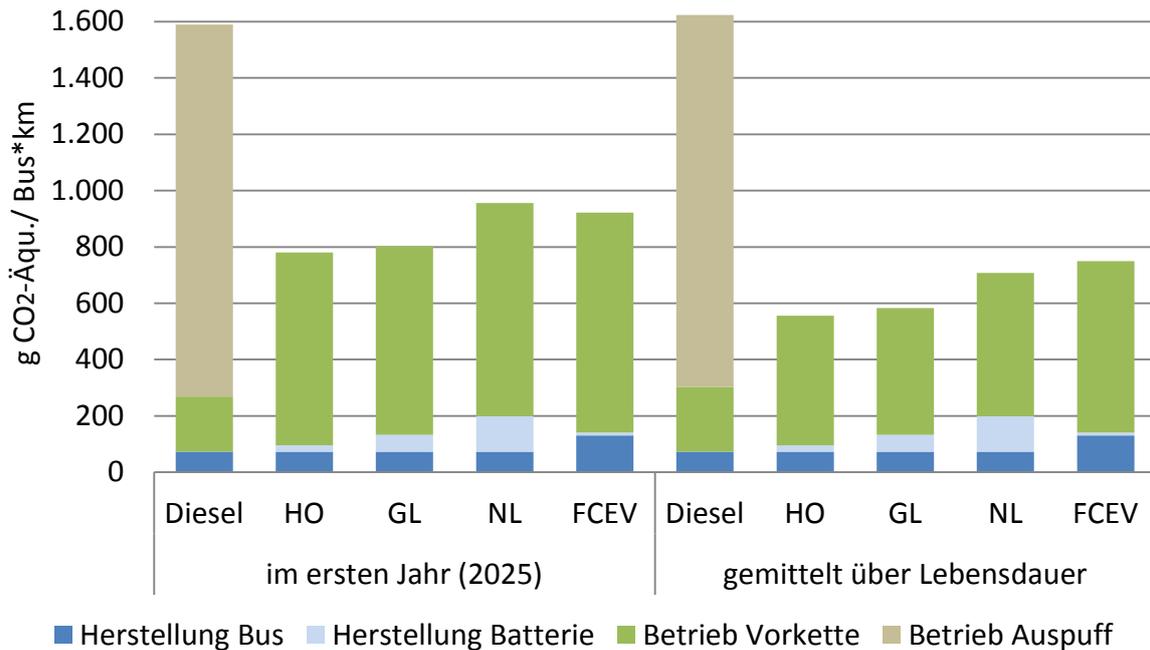


Abbildung 12: Treibhausgaseffekt der verschiedenen Antriebskonzepte (NZL 2025)

Partikel- und Stickoxidemissionen

Dieselpartikel und insbesondere Stickoxide der konventionellen Busse fallen vor Ort an (also z.B. in stark belasteten Innenstadtbereichen), während die elektrifizierten Busse lokal emissionsfrei fahren. Die Herstellungsemissionen sind bei allen Konzepten unabhängig vom Ort des Betriebes. Die Unterscheidung zwischen lokal (d.h. am Ort der Leistungserbringung) anfallenden und räumlich von der Leistungserbringung zu trennenden Emissionen (indirekte Emissionen) ist insbesondere vor der derzeitigen Situation mit Verletzung der Luftqualitätsrichtlinie der EU (RL 2008/50/EG „Clean Air for Europe“) in vielen Städten Deutschlands zu sehen. Mit Euro 6-Dieselsbussen könnte der ÖPNV seinen Anteil an den Grenzwertüberschreitungen zwar reduzieren, wenn aufgrund der Überschreitungen Fahrverbote für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren ausgesprochen werden sollten, wären auch die Diesellinienbusse betroffen.

Bei den Stickoxidemissionen dominieren bei allen Konzepten die indirekten Emissionen die Gesamtemissionen. Durch die hohen Emissionen in der Stromherstellung haben hier die mit Strom betriebenen Busse im ersten Jahr deutliche Mehremissionen je Bus-km gegenüber den verglichenen Konzepten (siehe Abbildung 13). Beim Betrieb von Stadtlinien haben die lokalen Stickoxidemissionen (Betrieb Auspuff) des Dieselsbusses jedoch eine besondere Relevanz.

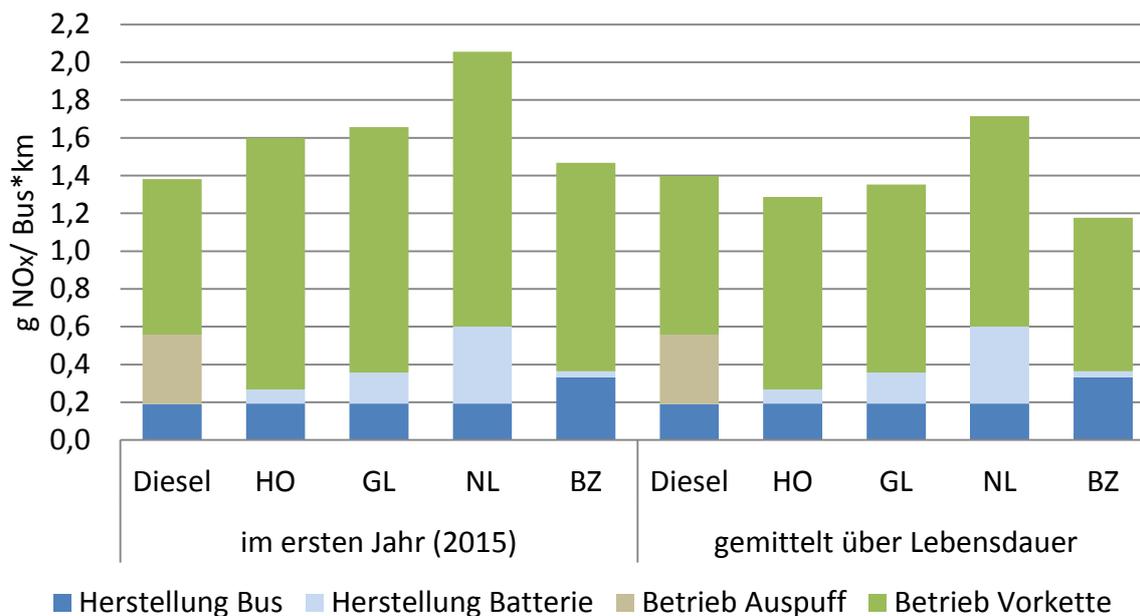


Abbildung 13: Stickoxidemissionen der verschiedenen Antriebskonzepte (NZL 2015)

Durch Verbesserungen im Strommix erreichen der HO-Bus und der GL über der Lebensdauer der Busse niedrigere Gesamtemissionen als der Dieselmotor, der Nachtlader hat höhere Emissionen aufgrund der größeren Batterie. Der Brennstoffzellenhybridbus hat insgesamt die niedrigsten Emissionen über die Lebensdauer. Für 2025 neu zugelassene Busse zeigt sich ein ähnliches Bild (siehe Abbildung 14).

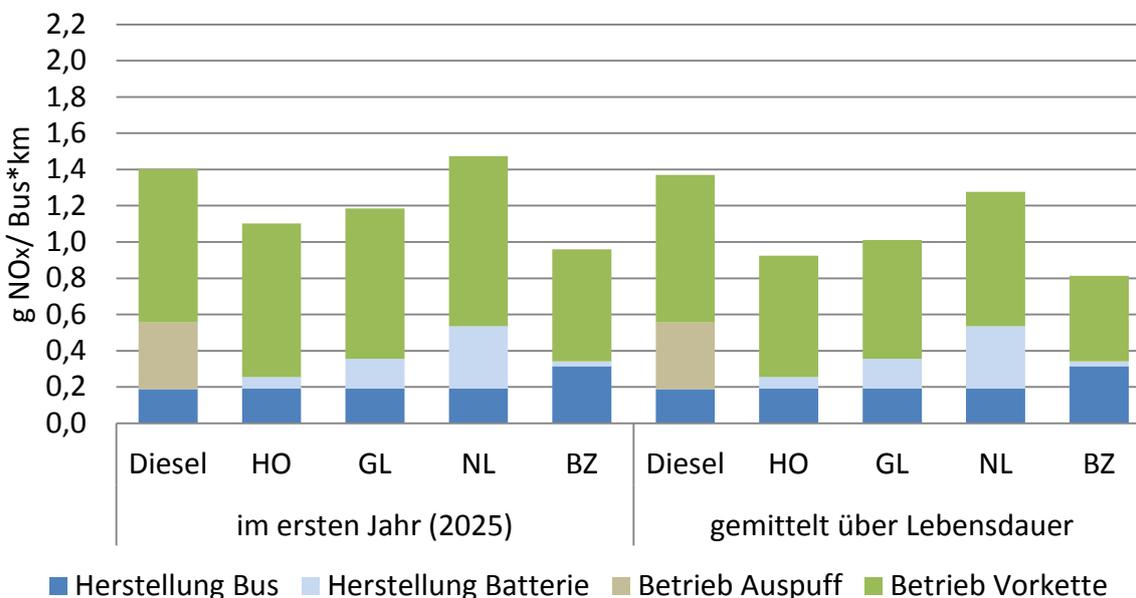


Abbildung 14: Stickoxidemissionen der verschiedenen Antriebskonzepte (NZL 2025)

Auch bei den Partikelemmissionen dominieren bei allen Konzepten die indirekten Emissionen die Gesamtemissionen. Die direkten Emissionen des Dieselmotors fallen dabei durch den Feinstaubfilter

sehr gering aus. Da auch die Emissionen aus der Vorkette niedriger sind als bei den verglichenen Konzepten, ergeben sich deutliche Vorteile gegenüber den elektrifizierten Varianten (Abbildung 15). Dies wird voraussichtlich auch, wie in Abbildung 16 gezeigt, in Zukunft so bleiben.

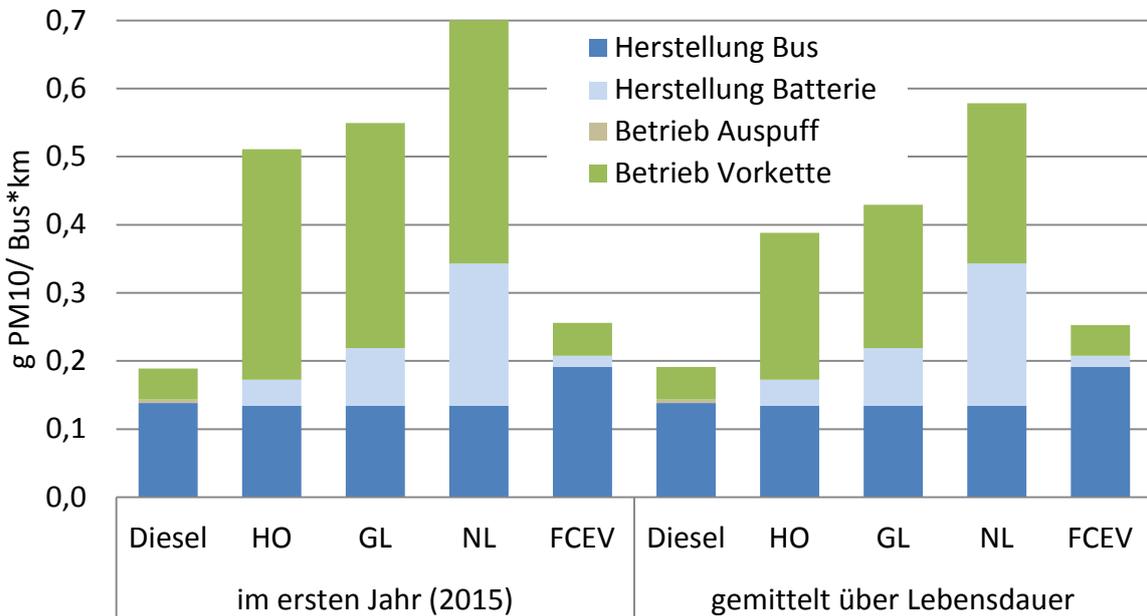


Abbildung 15: Partikelemissionen der verschiedenen Antriebskonzepte (NZL 2015)

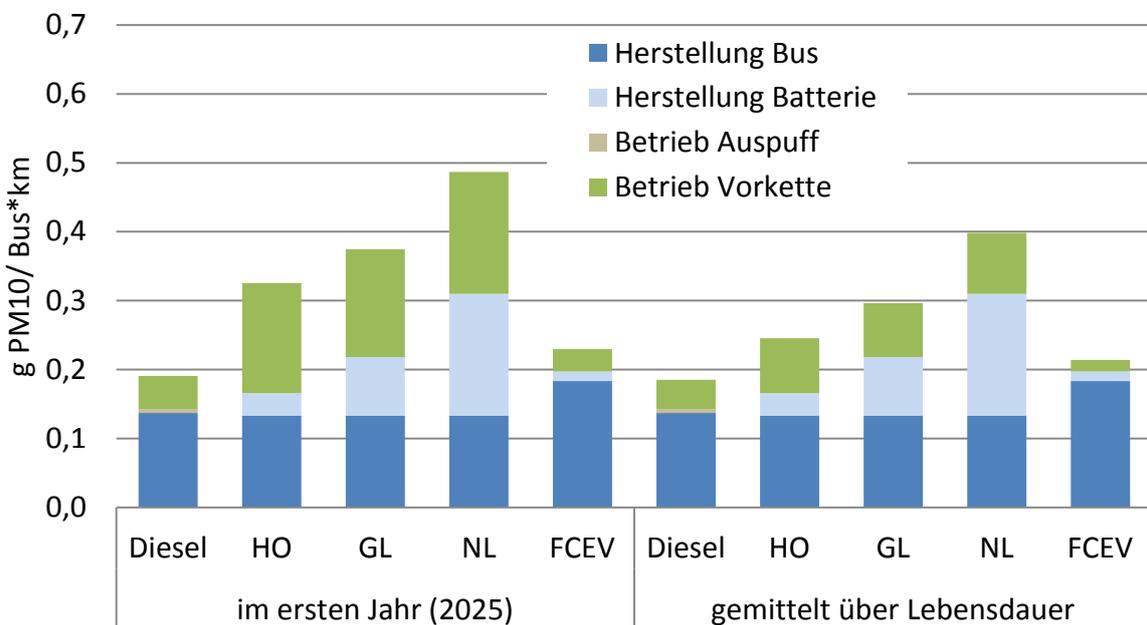


Abbildung 16: Partikelemissionen der verschiedenen Antriebskonzepte (NZL 2025)

7 Lebenszykluskosten alternativer Busantriebskonzepte

Die **Kosten je Bus-Kilometer** und die **Kosten je angebotene Beförderungskapazität (Passagiere je Stunde und Richtung)** der verschiedenen Buskonzepte setzen sich dabei zusammen aus den auf die Fahrleistung bzw. aus dem Produkt aus Fahrleistung und Gefäßkapazität umgelegten Kosten für:

- Fahrzeuge
- Infrastruktur
- Ersatzinvestitionen (z.B. für während der Lebenszeit des Busses notwendige Batteriewechsel)
- Energie
- Wartung- und Instandhaltung
- Fahrer

Für die Berechnung der Annuitäten wurde in der Kostenrechnung ein Zinssatz von 5% zugrunde gelegt.

7.1 Fahrzeugkosten

Die angenommenen Fahrzeugkosten werden aus den Kosten der verwendeten Komponenten ermittelt. Dieser Ansatz besitzt gegenüber der Verwendung von Marktpreisen (die in 2015 etwa 100 000 bis 200 000 € über den abgeleiteten Kostensätzen liegen) den Vorteil, dass die abgeleiteten Kosten unabhängig von der aktuellen Marktsituation¹³ sind, sowie das über die Projektion von Kostenminderungen bei den Komponenten begründete Abschätzungen zu zukünftigen Fahrzeugkosten möglich sind.

Die Ausgestaltung der Komponenten der Busse ist in Kapitel 4.1 dargestellt. Die spezifischen Komponentenkosten sind weitestgehend Literaturangaben entnommen bzw. entstammen Schätzungen aufbauend auf Gesprächen mit Herstellern:

¹³ Die Marktsituation ist u.a. abhängig von der Anzahl der Hersteller und den bestellten Losgrößen. Die aus der Marktsituation ergebenden Hemmnisse sind in Kapitel 10.4 gesondert diskutiert.

Tabelle 23: Spezifische Kosten wesentlicher Buskomponenten (nominal in €, 2015)

		Quelle	2015	2020	2025	2030
Batterie	€/kWh	2015 Investitionskosten Expertenschätzung Prof. Pütz/ Entwicklung 2015 - 2030 nach [FH ISI, 2013]	1.000	784	684	622
Brennstoffzelle	€/kW	[McKinsey, 2012], "Production-at-Scale"-Szenario	1.161	609	542	432
Wasserstofftank	€/kWh	[Delft, 2013]	26	18	14	10
Elektromotoren und Leistungselektronik (Automotive)	€/kW	Expertenschätzung Prof. Pütz	300		100	
Elektromotoren und Leistungselektronik (Bahn)	€/kW	Expertenschätzung Prof. Pütz	550		350	
Pantograph	€	Expertenschätzung Prof. Pütz	45.000		45.000	
Antriebsachse	€	Expertenschätzung Prof. Pütz	15.000		15.000	

Neben den Kosten der Elektrobusse basierend auf automotiver Elektrotechnik (Elektromotoren, Leistungselektronik) mit einer 12-jährigen Lebensdauer in Abbildung 17 ist als Sensitivität die Verwendung von kosten-intensiverer, aber langlebigerer (20 Jahre Lebensdauer) Bahntechnik berechnet.

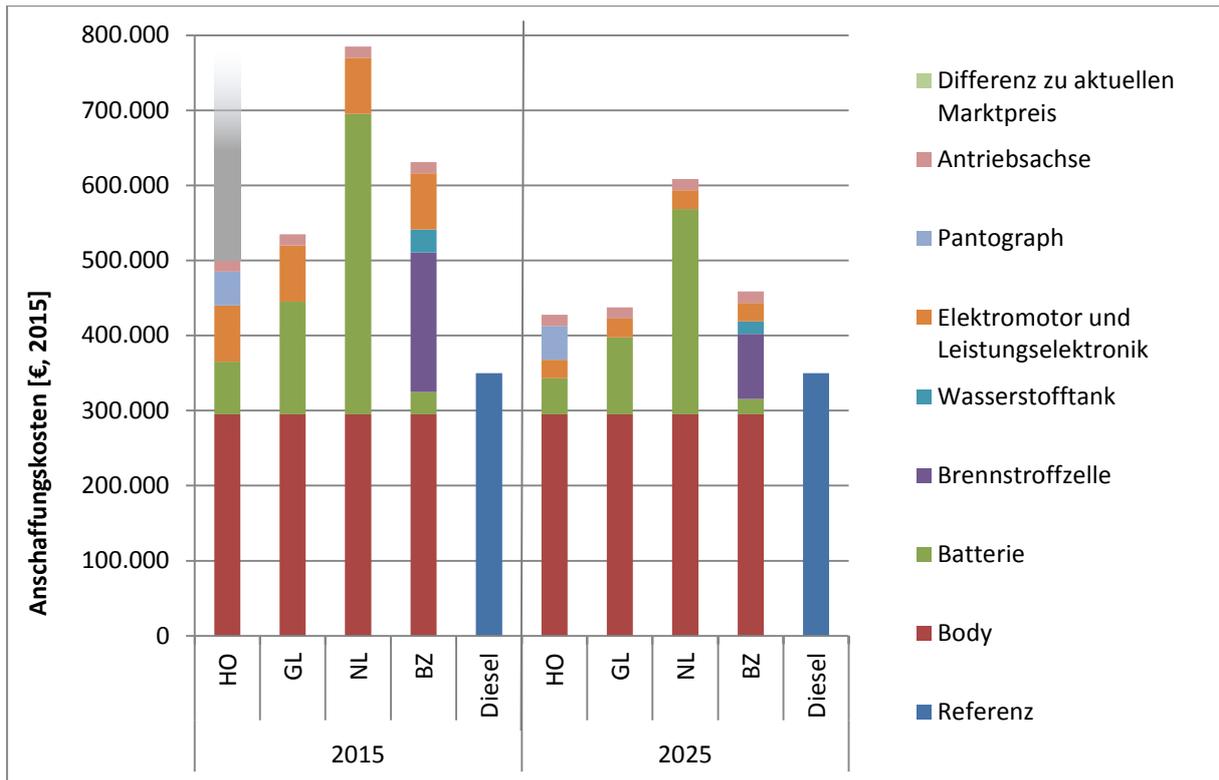


Abbildung 17: Investitionskosten Fahrzeuge nach Antriebskonzept in automotiver Elektrotechnik, Gelenkbus, 18 m, 2015 und 2025

Tabelle 24: Investitionskosten Fahrzeuge nach Antriebskonzept, Gelenkbus, 2015 und 2025 (nominal in €, 2015)

Antriebskonzept	2015	2025
Hybrid-Oberleitung	500 000 €	428 000 €
Gelegenheitslader	535 000 €	438 000 €
Übernachtlader	785 000 €	609 000 €
Brennstoffzelle	631 000 €	459 000 €
Diesel	350 000 €	350 000 €

Daneben ist als Sensitivität die Ausstattung der Elektrobuskonzepte mit zwei angetriebenen Achsen betrachtet. Dies führt zu einem höheren zulässigen Gesamtgewicht bei angenommenen Mehrkosten von 25 000 € je Bus.

Die Restwerte der Busse wird nach 12 Jahren mit 5% angenommen, nach 20 Jahren mit 0%.

7.2 Infrastrukturkosten

Die Annahmen zu der Infrastrukturausführung in Abhängigkeit der Taktfrequenz sind in Kapitel 4.2 dargestellt. Darauf aufbauend sind in Tabelle 25 die Kosten für den Einsatz von 15 Bussen (7,5 Minuten Takt) beispielhaft dargestellt.

Tabelle 25: Eckdaten Infrastruktur (15 km lange Linie, Einsatz von 15 Bussen)

	Infrastruktur	Quelle	Kosten spezifisch [€]	Bezug	Kosten Linie [€]
Hybrid-Oberleitung	Oberleitungen, beidseitig	Expertenschätzung 2. Workshop	350 000	je km Oberleitungslänge	2 625 000
	Unterwerke	Expertenschätzung Prof. Pütz			1.720.000
	Ladepunkt Betriebshof	e8energy GmbH - Ladestation @fast	15 900	je LP	0 (238.500)
Gelegenheitslader	Schnellladepunkt	Expertenschätzung	250 000	je LP	1.000.000
	Ladepunkt Betriebshof	e8energy GmbH - Ladestation @fast	15 900	je LP	238.500
	Unterwerk Betriebshof	Skalierung anhand Leistung			430 000
Übernachtslader	Ladepunkt Betriebshof	Expertenschätzung Prof. Pütz	29 000	je LP	540.000
	Unterwerk Betriebshof	Skalierung anhand Leistung			860 000
Brennstoffzelle	Wasserstoff-tankstelle	[McKinsey, 2012]	3 753 000	je Tankstelle	938 250

Für die Instandhaltung der Infrastruktur werden pauschal jährlich 2% der Investitionskosten angenommen.

Für die **Oberleitungsinfrastruktur** werden von den Herstellern Kostenreduktionen gegenüber klassischen Oberleitungssystemen von bis zu 80 % (auf bis zu 150 000 € je km Streckenlänge) angenommen [Vossloh Kiepe GmbH, 2014]. Dies wird neben den um 50 % reduzierten Kosten aufgrund der halbierten Oberleitungslänge insbesondere durch wegfallende Kosten für Weichen, Kurven und Kreuzungen begründet. Das über das Reduzieren der Oberleitungslänge hinaus

angenommene Kostensenkungspotential dürfte dabei sehr vom konkreten Anwendungsfall abhängen. Um dieses Potential nicht zu überschätzen, werden, aufbauend auf den im zweiten Workshop geäußerten Erfahrungen der heutigen deutschen Oberleitungsstädte (Solingen, Eberswalde) mit klassischer Oberleitungsinfrastruktur, Kosten von 350 000 €/km für beidseitiger Oberleitung (bzw. 175 000 €/km Streckenlänge) angenommen.

Für einen **Schnellladepunkt** werden Kosten von 250 000 € angenommen. Dies stellt die untere Grenze der Kosten nach Aussagen der befragten Experten dar. Abhängig von den Bedingungen vor Ort können Kosten von bis zu 400 000 € je Ladepunkt auftreten (Mail Dr. Faltenbacher, 24.6.2015).

7.3 Weitere Kosten

Die Annahmen zu den **Energiekosten** der Energieträger Strom und Diesel entstammen der Energiereferenzprognose von 2014 [Ewi, et al., 2014]. Für den Strompreis werden dabei die Preise für Handel und Gewerbe (GHD) angenommen, da er den heute von den Verkehrsbetrieben zu bezahlenden Preisen am nächsten kommt. Der Dieselpreis ist der in der Energiereferenzprognose angegebene Preis exklusive den von den Verkehrsbetrieben nicht zu entrichtenden Steuern (Mehrwert- und Energiesteuer). Zwischen den angegebenen Stützjahren wird linear interpoliert. Der Preis für Wasserstoff entstammt den Energieszenarien für das Energiekonzept [Prognos, 2010].

Mit den Annahmen steigen die Preise für Diesel bis 2030 um 25 % an, während die Preise für Strom, nach einem zwischenzeitlichen Hoch bedingt durch eine höhere EEG-Umlage, etwa konstant bleiben. Trotzdem bleibt Diesel bis 2030 bezogen auf den Energieinhalt mit 0,14 €/kWh deutlich günstiger als Strom (siehe Tabelle 26).

Tabelle 26: Energiekosten im Untersuchungsfall

		2015	2020	2025	2030	2040
Strom	€/kWh	0,20	0,22	0,23	0,21	0,20
	<i>davon EEG-Umlage</i>	<i>0,05</i>	<i>0,07</i>	<i>0,07</i>	<i>0,04</i>	<i>0,02</i>
	<i>davon Stromsteuer</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>
Diesel	€/l	1,15	1,22	1,29	1,37	1,50
Wasserstoff	€/kg	8	6,5	5	5	5

Die **Wartungs- und Instandhaltungskosten** der Antriebskonzepte basieren auf Expertenschätzungen von Prof. Pütz. Die höheren Kosten bei einer 20 jährigen Nutzung resultieren aus den nach etwa 12 Jahren notwendigen umfangreichen Refitting, welches für alle Elektrobuskonzepte als identisch angenommen ist und auf [Pütz, 2010] aufbaut. Aufgrund des heute noch benötigten Spezialisten zur Wartungs- und Instandhaltung der Brennstoffzelle sind derzeit die Kosten für Brennstoffzellenhybridbusse deutlich höher als bei den verglichenen Elektrobuskonzepten. Langfristig ist bei einer Serienfertigung der Brennstoffzellenhybridbusse jedoch mit einer Angleichung der Kosten zu rechnen.

Tabelle 27: Wartungs- und Instandhaltungskosten [€ je Bus-km]

		Neuzulassungsjahr	
Lebensdauer	Antriebskonzept	2015	2025
12 Jahre	Hybrid-Oberleitung	0,58	0,58
	Gelegenheitslader	0,58	0,58
	Übernachtlander	0,58	0,58
	Brennstoffzelle	2,70	0,67
	Diesel	0,53	0,53
20 Jahre	Hybrid-Oberleitung	0,79	0,79
	Gelegenheitslader	0,79	0,79
	Übernachtlander	0,79	0,79
	Brennstoffzelle	2,91	0,88

Die **Fahrerkosten** werden für alle Antriebskonzepte gleich angenommen. Dabei wird von 2,5 Fahrern je Bus ausgegangen, woraus im Jahr Kosten von 98 900 € je Bus bzw. 1,65 je Bus-km entstehen [Pütz, 2010].

Als **Ersatzinvestitionen** werden in dem Modell die Kosten für Batterien und Brennstoffzellen betrachtet, die während der Lebensdauer des Busses ausgetauscht werden müssen. Die Komponentenkosten entsprechen dabei dem Jahr des Austausches, zudem werden die Investitionen entsprechend der Annuitätenrechnung auf das Austauschjahr diskontiert. Dabei wird für die Komponenten die in Tabelle 28 dargestellte Lebensdauer angenommen.

Tabelle 28: Austauschzeitpunkte wesentlicher Komponenten während der Buslebensdauer

	Lebensdauer Fahrzeug [Jahre]	Ersatz Batterie [Jahre nach NZL]	Ersatz Brennstoffzelle [Jahre nach NZL]
Hybrid-Oberleitung	12	5, 10	
	20	5, 10, 15	
Gelegenheitslader	12	5, 10	
	20	5, 10, 15	
Übernachtlander	12	5, 10	
	20	5, 10, 15	
Brennstoffzelle	12	5, 10	3, 6, 10
	20	5, 10, 15	3, 6, 10, 15

7.4 Ergebnisse der Lebenszykluskostenbetrachtung

Die Infrastrukturkosten des HO-Buses sind deutlich höher als bei den anderen Buskonzepten. Während die Infrastrukturkosten beim HO-Bus als weitgehend unabhängig von der Taktfrequenz angenommen werden können, nehmen Energie -, Personal- und Buskosten nahezu linear zu (siehe Abbildung 18). Dadurch reduziert sich in 2015 der Anteil der Infrastruktur von 13 % bei einem 10 Minuten Takt auf 7 % bei einem 5 Minuten Takt. Die Fahrerkosten sind der größte Kostenblock beim Betrieb einer Linie mit mindestens 39 % Anteil an den Gesamtkosten.

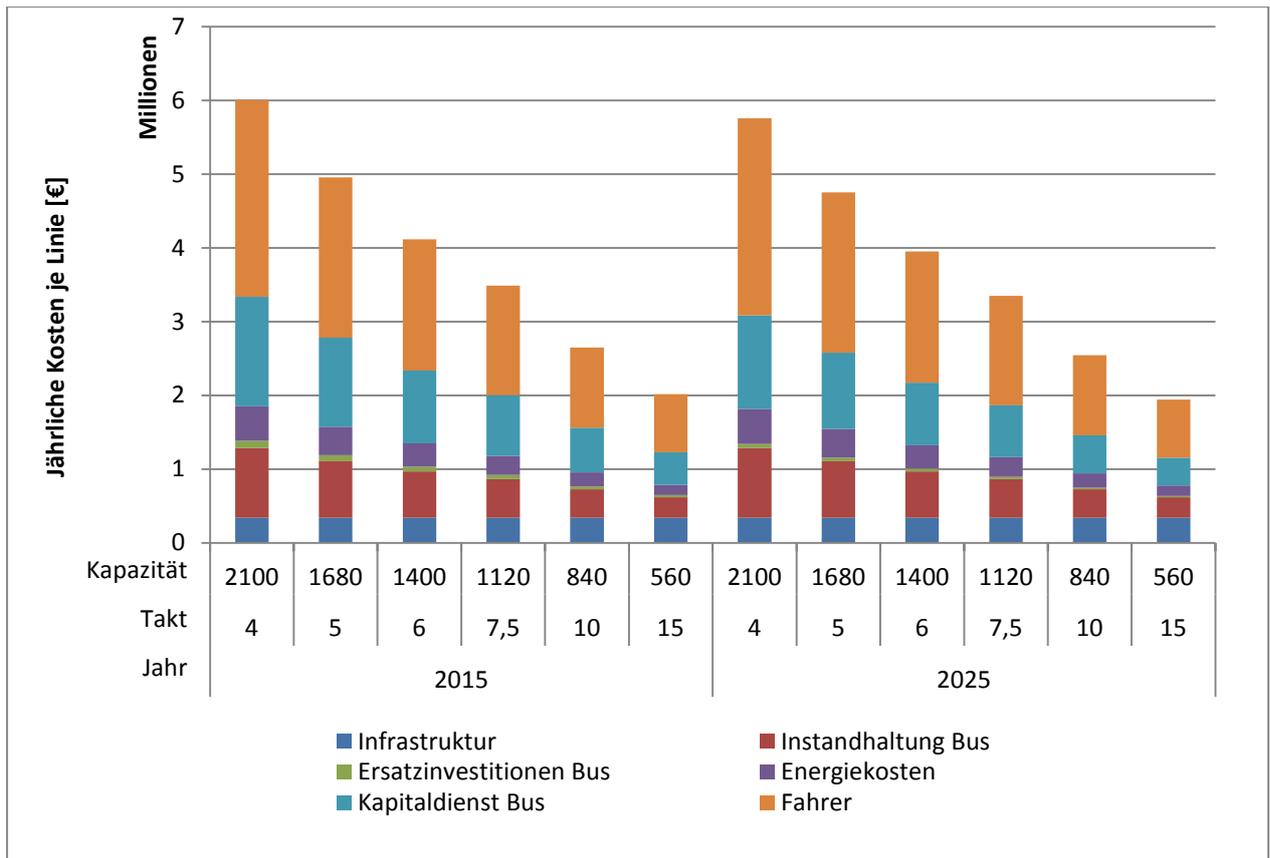


Abbildung 18: Jährliche Kosten einer HO-Buslinie in Abhängigkeit von der Beförderungskapazität und dem Jahr

7.4.1 Kosten je Buskilometer

Mit einer Erhöhung der Taktfrequenz von 10 auf 5 Minuten sinken die spezifischen Infrastrukturkosten beim HO-Bus um 24 ct/Bus-km. Der HO-Bus besitzt damit einen deutlichen Skaleneffekt hinsichtlich des angebotenen Taktes. Für den Kostenvergleich mit den weiteren Antriebstechnologien in Abbildung 19 wird eine Taktfrequenz von 7,5 Minuten angenommen.

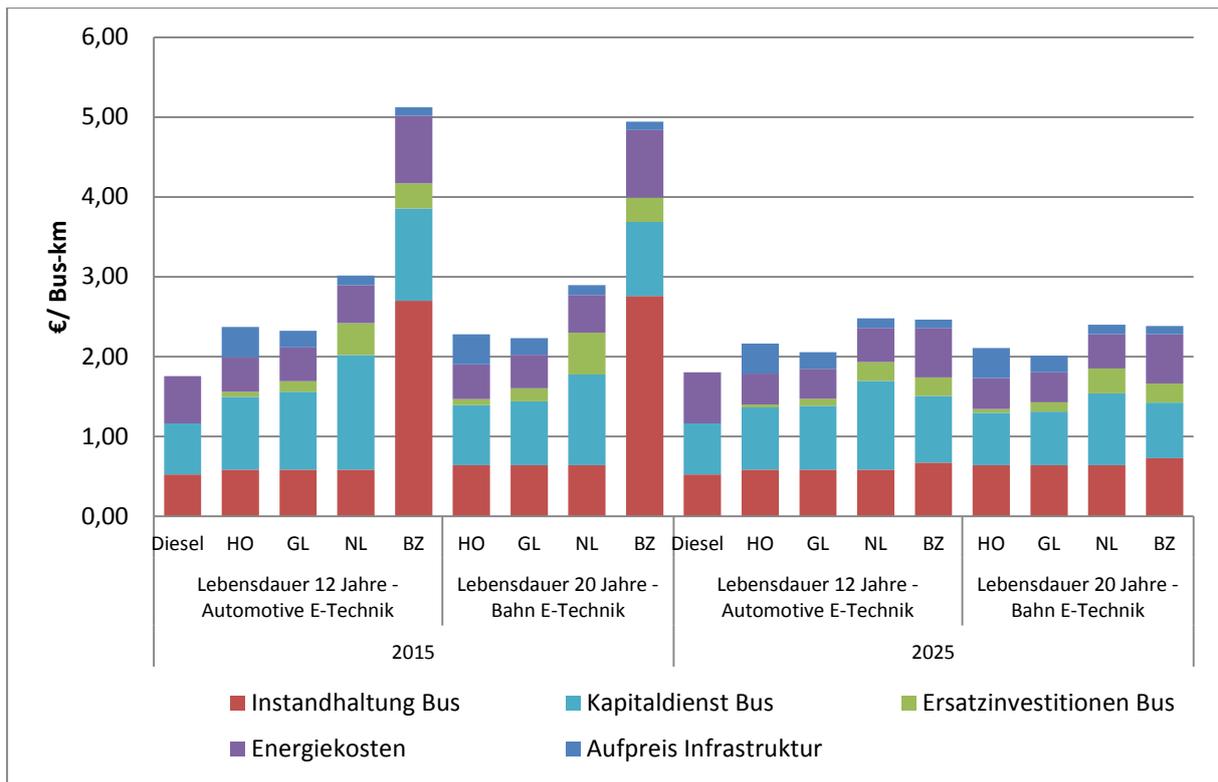


Abbildung 19: Kostenvergleich Antriebstechnologien von Gelenkbussen, 18 m (Lebenszykluskosten ohne Fahrerkosten), Takt 7,5 min (Anwendungsfall Eberswalde)

Anmerkungen und Folgerungen zu Abbildung 19:

- Heute sind alle Elektrobustechnologien teurer als der Dieseldieselbus, mittelfristig (im Jahr 2025) können Elektrobusse – insbesondere wegen der anzunehmenden Steigerung der Dieselpreise als auch der Reduktion der Batteriekosten - wirtschaftlich konkurrenzfähig werden.
- Die Kosten der Elektrobustechnologien gleichen sich langfristig einander an. Bezogen auf die Bus-km sind die HO- und die GL-Busse sowohl heute als auch in 2025 die kostengünstigsten Elektrobustechnologien. Konzepte mit höherer Flexibilität (keine streckenseitige Infrastruktur) wie BZ und NL sind auch in 2025 teurer als GL und HO-Busse.
- Die Mehrkosten des HO-Busses gegenüber dem GL resultieren insbesondere aus den höheren Aufwendungen für die Oberleitungsinfrastruktur. Ohne Infrastrukturkosten, also falls bereits eine Investition in diese getätigt wurde, stellt der HO-Bus im gesamten betrachteten Zeitraum das kostengünstigste Elektrobussystem dar.
- Ein 20-jähriger Betrieb der Elektrobustechnologien führt, trotz höherer Anschaffungs- und Instandhaltungskosten der Busse, zu einer Senkung der Kosten je Bus-km für alle betrachteten Elektrobustechnologien. Dies kann die Wirtschaftlichkeitslücke zum Dieseldieselbus in 2015 aber nicht schließen.
- Die heute vorhandenen Brennstoffzellenhybridbusse sind Prototypen, was sich u.a. durch hohe Instandhaltungsaufwände ausdrückt. Bei den BZ-Bussen werden hohe Kostensenkungspotentiale gesehen, insbesondere durch Reduktion der Brennstoffzellenkosten sowie durch eine höhere Lebensdauer der Brennstoffzellen. Die

Kostenentwicklung von Brennstoffzellenhybridbussen ist dabei mit hohen Unsicherheiten verbunden, die wesentlich von der Marktdurchdringung von BZ-Fahrzeugen in anderen Märkten abhängt. In der angenommenen Preisentwicklung wird davon ausgegangen, dass keine signifikante Marktdurchdringung von Brennstoffzelle in anderen Märkten geschieht.

7.4.2 Kosten je angebotener Beförderungskapazität

Während auf nachfrageschwachen Linien die Bedienfrequenz ein wesentliches Qualitätsmerkmal darstellt, ist auf nachfragestarken Linien die **angebotene Beförderungskapazität (Passagiere je Stunde und Richtung)** entscheidend. Diese wird, neben dem gefahrenen Takt, durch die Beförderungskapazität je Fahrzeug bestimmt.

Die maximale Beförderungskapazität der Busse wird durch das zulässige Gesamtgewicht beschränkt. Durch das Mehrgewicht der Elektrobusse, insbesondere verursacht durch die Batterien, gegenüber den Dieseln wird daher die maximalen Beförderungskapazitäten der Elektrobusse eingeschränkt (siehe Tabelle 29). Aufgrund dessen ist angenommen, dass mittels Sonderzulassung sowie mittels einer **zweiten angetriebenen Achse** das zulässige Gesamtgewicht von 28 t auf 30 t erhöht wird, wie es beispielsweise von der Hess AG angeboten wird (bezogen auf die Achslasten wären dabei laut Straßenverkehrsordnung maximal 30,5 t möglich). Für die zweite angetriebene Achse wird ein erhöhtes Leergewicht des Fahrzeuges um 250 kg sowie Mehrkosten von 20 000 € angenommen.

Tabelle 29: Beförderungskapazität je Gelenkbus (18 m) nach Antriebskonzept

Antriebskonzept	Größe	Eine angetriebene Achse		Zwei angetriebene Achsen	
		2015	2025	2015	2025
HO-Bus	18 m	140	140		
GL	18 m	126	136	140	140
NL	18 m	77	101	101	124
BZ	18 m	140	140		
Diesel	18 m	140	140		

Der Anstieg der Passagierkapazität je Bus in 2025 gegenüber 2015 bei Gelegenheits- und Nachtladern wird durch angenommene Fortschritte in der Energiedichte der Batterien und damit deren Gewichtsreduktion erzielt.

Sehen die betrieblichen Anforderungen eine bestimmte **Beförderungskapazität** vor, lassen sich aus den berechneten Werten die Anzahl der benötigten Fahrzeuge und die Kosten für diese Kapazität je Antriebstechnologie ableiten (siehe Abbildung 20 und Abbildung 21).

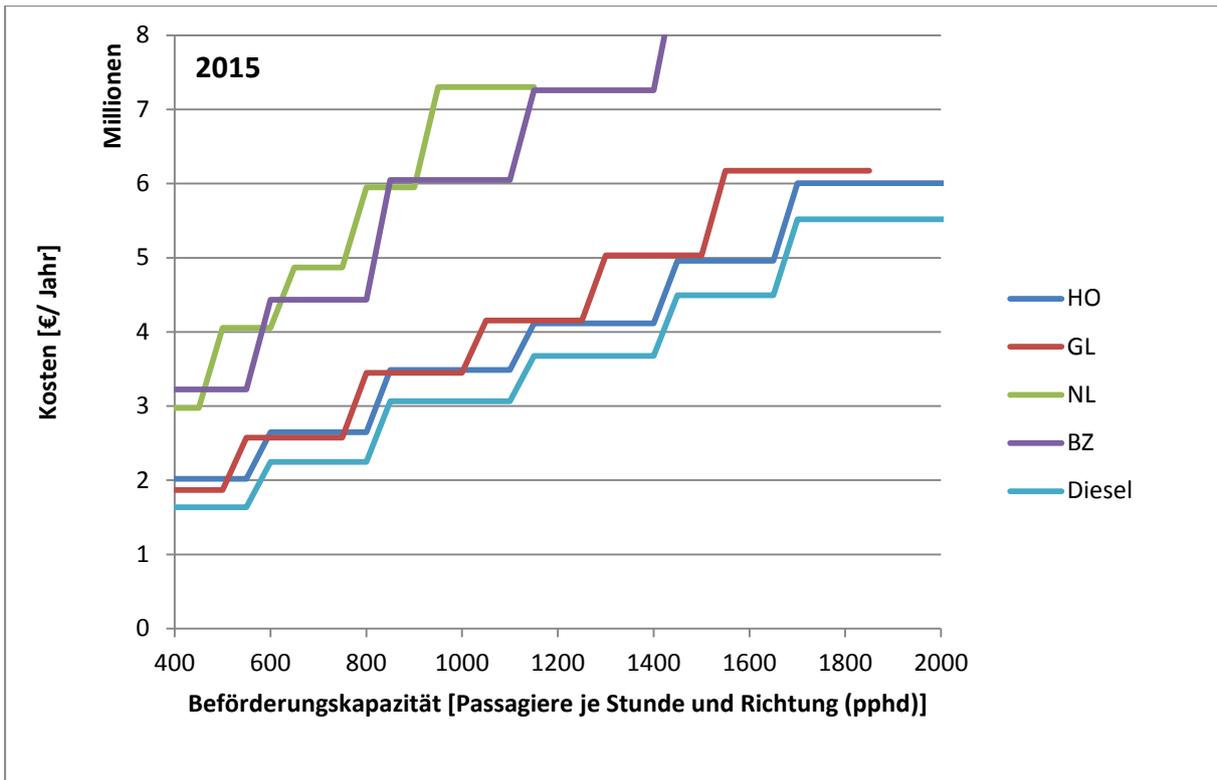


Abbildung 20: Linienkosten je Beförderungskapazität 2015 (eine angetriebene Achse, 18m Busse)

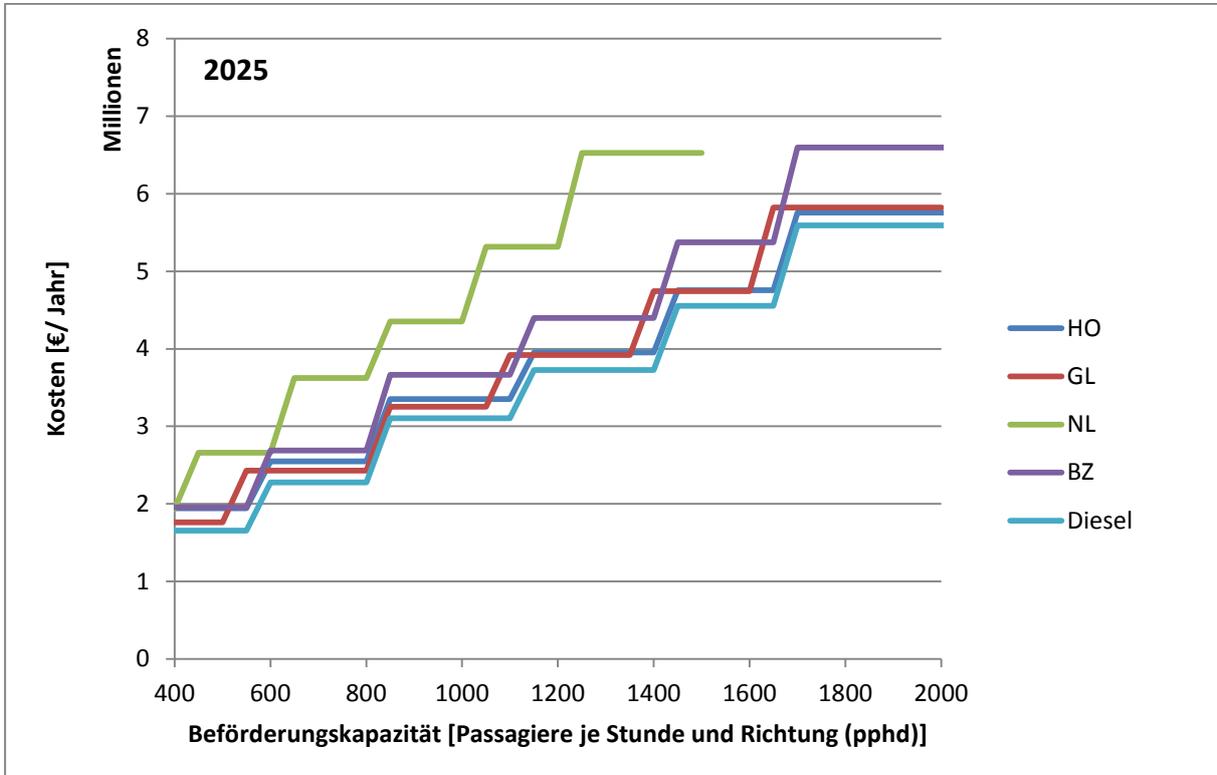


Abbildung 21: Linienkosten je Beförderungskapazität 2025 (eine angetriebene Achse, 18m Busse)

Bei niedrigen Beförderungskapazitäten liegen der HO-Bus und der GL in 2015 auf einem Kostenniveau. Bei hohen Beförderungskapazitäten (ab etwa 1.000 Passagiere je Stunde und Richtung) – und damit hoher Auslastung der Infrastruktur - ist der HO-Bus in 2015 der kostengünstigste Elektrobus innerhalb des betrachteten Kapazitätsbereiches. Dabei führt die durch die steigende Energiedichte der Batterien ausgelöste erhöhte Platzkapazität des GL in 2025, zusammen mit der Kostensenkung der Fahrzeuge, zu einer deutlichen Steigerung der Wirtschaftlichkeit.

Die Entwicklung bei den GL führt zu einer weiteren Annäherung der Kosten zwischen dem HO-Bus und dem GL, bei steigender Unsicherheit bezüglich der Kostenentwicklung. Eine eindeutige Aussage hinsichtlich der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit ist damit nicht möglich, tendenziell kann aber bei hohen Beförderungskapazitäten ein Wirtschaftlichkeitsvorteil für den HO-Bus, bei niedrigen Kapazitäten ein Vorteil für den GL abgeleitet werden.

In Abbildung 22 und Abbildung 23 sind die Linienkosten je angebotene Beförderungskapazität differenziert nach Taktfrequenz (Anzahl Fahrzeuge) dargestellt. Ein niedrigerer Wert drückt damit eine höhere Kosteneffizienz einer Technologie bezogen auf die Beförderungskapazität aus.

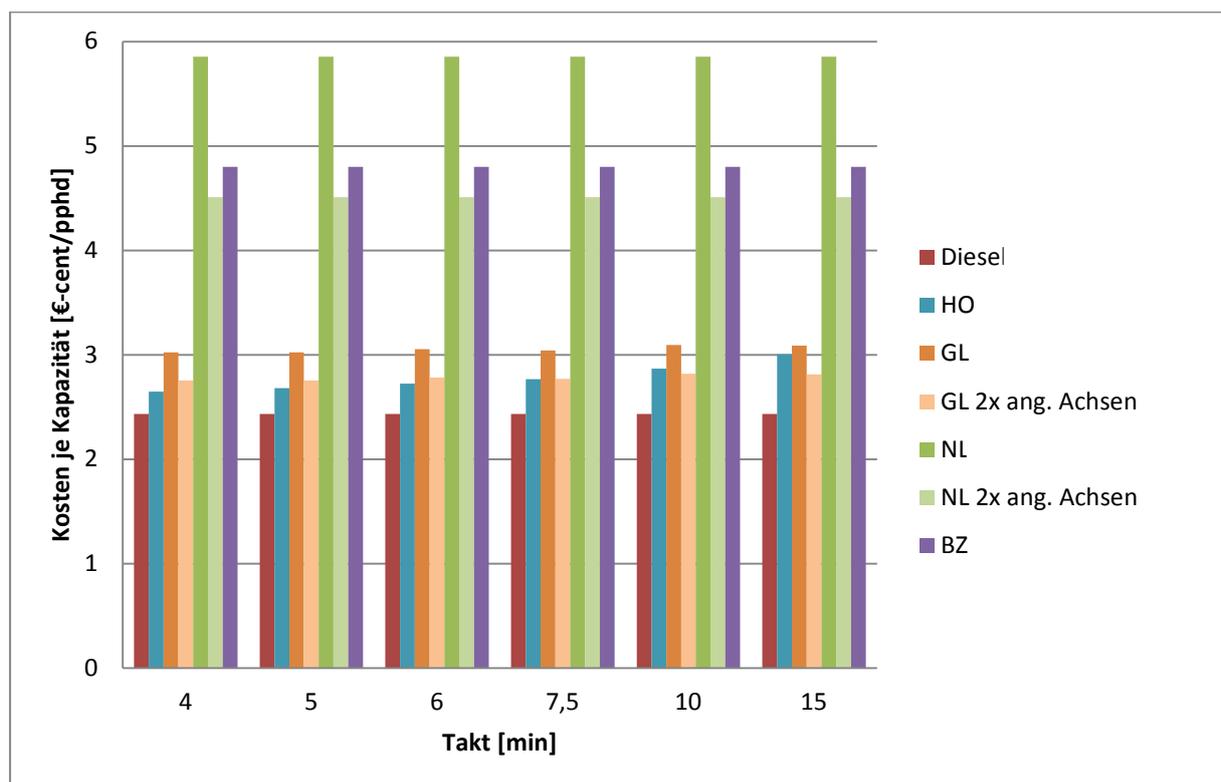


Abbildung 22: Kosten je angebotener Kapazität für Busantriebstechnologien bei verschiedenen Taktfrequenzen (2015, 18m Busse)

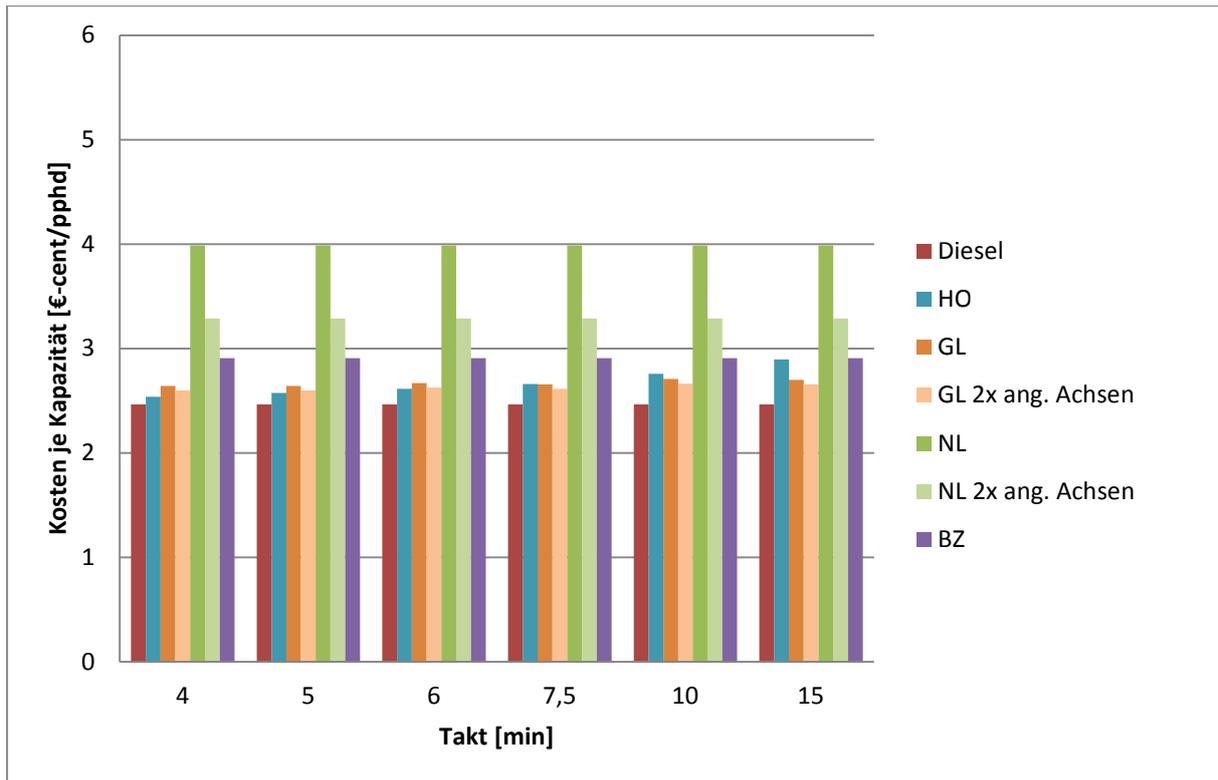


Abbildung 23: Kosten je angebotener Kapazität für Busantriebstechnologien bei verschiedenen Taktfrequenzen (2025, 18m Busse)

Insbesondere durch die hohen Kosten für den Fahrer (1,65 €/ Bus-km) senkt eine reduzierte Platzkapazität (und damit der Einsatz von mehr Bussen bei gleichbleibender angebotenen Kapazität) die Wirtschaftlichkeit je Beförderungskapazität deutlich. Dies betrifft insbesondere den NL, aber im reduzierten Maße auch den GL (bei einer angetriebenen Achse). Die Ausstattung mit einer zweiten Antriebsachse ist daher sowohl in 2015 als auch in 2025 für den NL und für den GL vorteilhaft.

Als **Sensitivität im Vergleich zwischen dem HO-Bus und dem GL** werden

- die Auswirkungen einer Verlängerung der minimalen Wendezeit beim GL, sowie
- die obere Grenze der Infrastrukturkosten beim HO-Bus, d.h. Kosten der Oberleitungsinfrastruktur von 500 000 €/km (statt 350 000 €/km) sowie einen zusätzlichen Ladepunkt im Betriebshof je Bus,

dargestellt. Eine Verlängerung der Wende-, und damit der Ladezeit, kann bei hohen Energiebedarf oder verspätungsanfälligen Linien notwendig sein.

In [Rogge, et al., 2015] ist dies für die Stadt Münster untersucht worden. Die Studie kommt dabei zu dem Schluss, dass unter den untersuchten Bedingungen (250 kW mittlere Ladeleistung¹⁴, Batteriekapazität 150 kWh) ungefähr 20 % der Fahrleistung mit dem GL ohne zusätzliche Ladezeiten

¹⁴ Es wird vereinfachend angenommen, dass die für den Untersuchungsfall in dieser Studie gewählte mittlere Ladeleistung von 250 kW etwa der in [Rogge, et al., 2015] angegebenen maximale Ladeleistung von 300 kW entspricht.

zu elektrifizieren wären. Eine Erhöhung der maximalen Ladeleistung an den Linienendpunkten auf 500 kW könnte die ohne Einschränkungen elektrifizierbare Fahrleistung auf etwa 60 % heben. Dabei ist jedoch zu beachten, dass eine entsprechend hohe Ladeleistung negative Auswirkungen auf die Ladeeffizienz und die Batterielebensdauer hat. Zudem werden die in der Studie betrachteten Fahrzeuge bei tiefen Temperaturen mittels einer zusätzlich installierten Kraftstoffheizung beheizt. Daher ist anzunehmen, dass bei einer umfangreichen Elektrifizierung des ÖPNVs mittels GL Verlängerungen der minimalen Wendezeiten in der Mehrzahl der Anwendungsfälle benötigt werden.

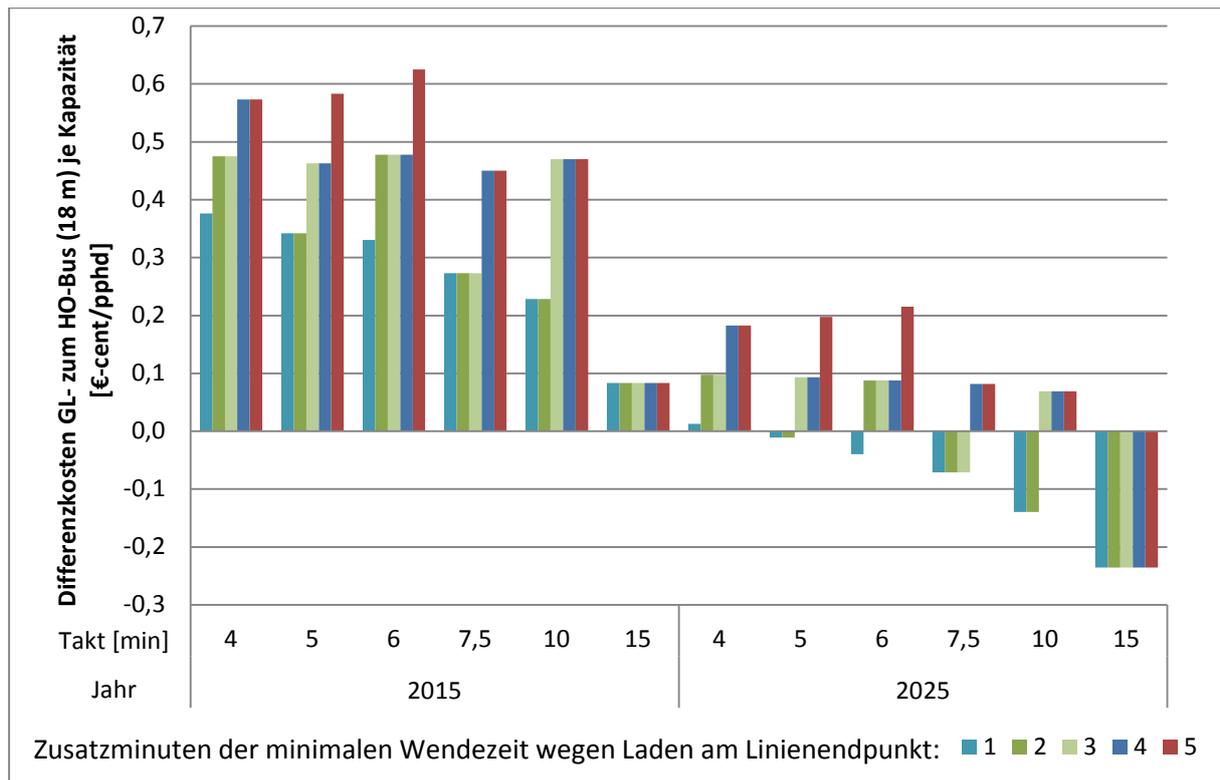


Abbildung 24: Differenzkosten zum Standardfall HO-Bus je angebotenen Platz-km

Wird eine Verlängerung der Wendezeit für einen stabilen Betrieb eines GL benötigt, ist mit deutlichen Mehrkosten zu rechnen. So steigen die Kosten des GL gegenüber dem HO-Bus bei zusätzlichen drei Minuten Wendezeit aufgrund von Ladezeiten je nach Takt um bis zu 8 Prozentpunkte. Solange ein Takt kleiner 15 Minuten betrachtet wird, sind in 2025 auch bei den betrachteten Sensitivitäten die Kostenunterschiede zwischen dem HO-Bus und dem GL im Vergleich mit den vorhandenen Unsicherheiten gering. Bei einem 15-Minuten-Takt ist der GL in jeder betrachteten Sensitivität vorteilhaft.

Höhere Infrastrukturkosten reduzieren den Kostenvorteil des HO-Busses in 2015 deutlich, insbesondere bei einem Takt größer 7,5 Minuten. Im Untersuchungsfall bei 7,5 Minuten Takt erhöhen sich die Gesamtkosten durch die höheren Aufwendungen für die Infrastruktur um etwa 11 %, in 2025 um etwa 15 %. Aufgrund der Sensitivität der Ergebnisse hinsichtlich der Infrastrukturkosten sind diese für den konkreten Anwendungsfall genau zu analysieren. Die Infrastrukturkosten sind dabei in hohem

Maße von der Situation vor Ort abhängig und können im Rahmen einer derartigen Überblicksstudie nicht im Detail betrachtet werden.

8 Hemmnisse und Handlungsempfehlungen

In diesem Kapitel wird eine Übersicht zu den Hemmnissen der Einführung von HO-Bussen in Deutschland und ein Ausblick auf Handlungsoptionen zum Abbau dieser Hemmnisse gegeben. Grundlage dafür waren eine Literaturrecherche, Expertengespräche sowie zwei im Zusammenhang mit diesem Projekt durchgeführte Workshops im BMVI. Der erste Workshop hatte den Titel „*Hybrid-Oberleitungsbusse – Ein Beitrag zur Gestaltung der Energiewende im Verkehrssektor oder Techniknostalgie?*“ [BMVI, 2015a] und hat sich auf die Fragestellungen bezogen, unter welchen Einsatzbedingungen der HO-Bus eine sinnvolle Alternative zum Dieselbus bzw. zu anderen elektrischen Bustechnologien sein kann. Der zweite Workshop („*Der Hybrid-Oberleitungsbus – wirtschaftliche Möglichkeiten und ästhetische Herausforderungen für die Elektrifizierung des städtischen Busverkehrs*“ [BMVI, 2015b]) hat sich dann auf die bis dahin identifizierten Hemmnisse bezogen, insbesondere wurden die städtebaulichen Herausforderungen thematisiert.

8.1 Mehrkosten gegenüber Dieselbus

Der öffentliche Straßenpersonenverkehr mit Bussen und Bahnen in Deutschland wird von Verkehrsunternehmen erbracht, die entweder von den Kommunen beauftragt werden (Aufgabenträger), oder sich im Besitz von diesen befinden (Eigenerbringung). Bei der Finanzierung der Verkehrsleistung wird dabei zwischen dem konsumtiven Bereich für den Betrieb inklusive Fahrzeugbeschaffung und dem investiven Bereich für Infrastrukturinvestitionen unterschieden.

Im konsumtiven Bereich existiert die Eigenwirtschaftlichkeitsforderung im Personenbeförderungsgesetz, d.h. die Deckung der Betriebskosten durch Fahrgeldeinnahmen und Fahrgeldsurrogate¹⁵ [Bormann, et al., 2010]; real sind in nahezu allen Verkehrsbetrieben zusätzliche öffentliche Zuschüsse für den Betrieb notwendig, wie auch der durchschnittliche Kostendeckungsgrad des ÖPNV von 57 % (inkl. steuerrechtlichen Regelungen) mittels der oben beschriebenen Einnahmequellen aufzeigt [Maaß, et al., 2015].

Ist die Kommune lediglich Aufgabenträger, sind die Zuschüsse dabei in den mit den Aufgabenehmern abgeschlossenen Leistungsverträgen geregelt. Oft ist es für Kommunen vorteilhafter, insbesondere wenn sie historisch über ein eigenes Verkehrsunternehmen verfügen, die Verkehrsleistung im Eigenbetrieb zu erbringen. Hier sind die Defizite des im kommunalen Besitz befindlichen Verkehrsunternehmens direkt über den kommunalen Haushalt auszugleichen, dafür können über den Querverbund mit anderen kommunalen Unternehmen (insbesondere Stadtwerke) Steuern gespart werden (siehe Abbildung 25)¹⁶. [Maaß, et al., 2015]

¹⁵ Zahlungen an die Verkehrsbetriebe für die Beförderung im Ausbildungsverkehr und für die Beförderung Schwerbehinderter

¹⁶ Die Eigenerbringung von Verkehrsleistungen ohne Ausschreibung ist von seiten der EU jedoch nur unter engen Rahmenbedingungen zugelassen, die im Wesentlichen sind:

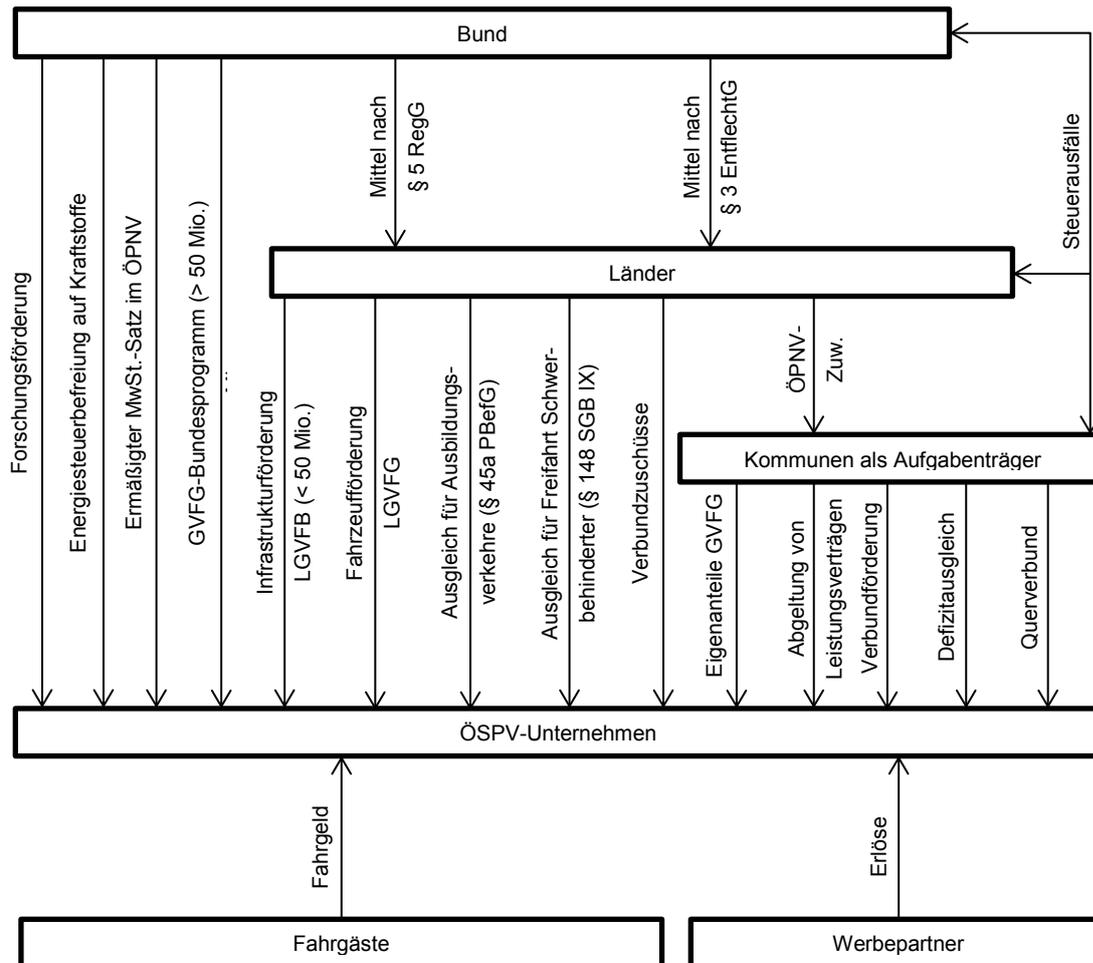


Abbildung 25: Darstellung der Finanzierung des ÖSPV, aufbauend auf [Bormann, et al., 2010]

Die Einnahmen aus dem Fahrgeld sind dabei in den letzten Jahren weitestgehend maximiert worden. Mehrkosten für die Elektrifizierung des städtischen Busverkehrs werden daher in der Regel nicht durch höhere Fahrpreise auszugleichen sein. Allerdings ist zumindest eine teilweise Deckung der

- Keine Teilnahme an Ausschreibungen außerhalb des eigenen Zuständigkeitsbereiches, keine Beteiligung von privatwirtschaftlichen Unternehmen
- Bezuschussung der Verkehrsleistung muss im üblichen Rahmen liegen (keine Überkompensation der Leistung)

Insbesondere der letzte Punkt kann dabei bei der Eigenerbringung kritisch sein, sollte ein privates Unternehmen auf eine Ausschreibung klagen und gleichzeitig anbieten, die Verkehrsleistung deutlich günstiger zu erbringen.

Diese Gefahr besteht beim Betrieb mit HO-Bussen (sowie bei Straßen-, Stadt- und U-Bahnen) nicht, da Mitbewerber für ein gleichwertiges Angebot eine eigene Infrastruktur installieren müssten, und somit die Abgabe eines günstigeren Angebots nahezu ausgeschlossen ist. Demgegenüber könnte aber eine Kommune, wenn sie kein Interesse an einer Eigenerbringung hat, Netz und Betrieb trennen und Letzteren getrennt ausschreiben.

Mehrkosten durch die Nutzer denkbar, wenn es gelingt, über eine mit der Einführung des HO-Busses verbundene Qualitätssteigerung zusätzliche Nutzergruppen zu gewinnen. Dies ist bei z.B. bei Neueinführungen von Straßenbahnen häufig der Fall. Insgesamt ist jedoch anzunehmen, dass ein Großteil der mit der Einführung des HO-Busses verbundenen Mehrkosten weder von den Verkehrsbetrieben selbst noch von den Nutzern getragen werden können, so dass diese primär die Kommunen übernehmen müssten.

Für die Kommunen sind dabei die Lebenszyklusmehrkosten und die höheren Anfangsinvestitionen der HO-Busse gegenüber dem Dieselbus ein Hemmnis. In [Schmied, et al., 2013] wird dazu festgestellt, dass sich die derzeit angespannte finanziellen Situation vieler Kommunen und daraus entstehende Investitionsschwäche immer mehr zum Innovationshemmnis im ÖPNV entwickeln. Daher entscheidet insbesondere die Fördersituation auf Seiten des Bundes und der Länder (siehe Abbildung 25 und folgende Unterkapitel), inwiefern sich die Mehrkosten und höheren Anfangsinvestitionen des HO-Busses als Hemmnis auf dessen Einführung auswirken.

8.1.1 Fördersituation von HO-Bus-Fahrzeugen

Fahrzeuge des ÖSPV werden sowohl vom Bund als auch von den Ländern gefördert. Der Bund fördert dabei innovative Technologien über verschiedene Programme. Dabei betreffen die Förderungen die Regelungen über Umweltbeihilfen in der Allgemeinen Gruppenfreistellungsverordnung (AGVO), Artikel 36 und ordnen sich damit in die von der EU definierte Höchstgrenzen ein: Zulässig ist eine maximale Förderquote von 40 % bezogen auf die Investitionsmehrkosten gegenüber der Referenztechnologie (Dieselbus).

Daneben können Fahrzeuge von den Ländern gefördert werden. Hier ist zu beachten, dass ein Fördergegenstand nicht mehrfach gefördert werden kann. Je nach Förderquote kann es aber sinnvoll sein, den „Basisbus“ über die Länder fördern zu lassen und die Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus über die Forschungsförderungen des Bundes. Fahrzeugförderung in den Ländern ist häufig über die jeweiligen Länderverkehrsfinanzierungsgesetze umgesetzt, es gibt aber teilweise auch gesonderte Busprogramme und Förderungen für innovative Technologien.

Tabelle 30: Förderung von alternativen Antrieben bei Gelenkbussen nach Bundesland, aufbauend auf [VDV, 2015], [MIL Thüringen, 2015], [MVI Baden-Württemberg, 2015]

Land	Maximale Mehrförderung gegenüber Diesel		Rechtsgrundlage	Mittel 2015
	Elektrobus (allgemein)	(H)O-Bus		
Baden-Württemberg		10 000 €	§ 2 Abs. 7 und § 5 Abs. 1 LGVFG; Busprogramm 2015	15 Mio. €
	50 % der Mehrkosten, maximal 150 000 € je Bus		Elektro- und Hybridbusprogramm 2015	
Bayern	10 000 €		§ 2.2.1 RZÖPNV, Abschnitt C	30 Mio. €
Mecklenburg-Vorpommern	30 000 €		§ 8 Abs. 5 ÖPNVG M-V; ÖPNV-BusRL	4,5 Mio. €
Niedersachsen	95 000 € ¹⁷		§ 2 und § 5 NdsGVFG	
Thüringen	75 % der Mehrkosten		ÖPNV-Investitionsrichtlinie 5.2.6	

8.1.2 Fördersituation von HO-Bus-Infrastruktur

Die Investitionskosten der Infrastruktur des HO-Busses können nicht über das Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz des Bundes gefördert werden, da

- zum einen diese nicht unter den in §2 genannten förderfähigen Vorhaben fallen (im Gegensatz zum z.B. Straßenbahnen) und
- zum anderen die Investitionskosten in der Regel deutlich unter den in §6 genannten 50 Mio. € liegen (Untersuchungsfall: 4,4 Mio. €) werden, ab denen der Bund sich beteiligt.

Daher können die Investitionen nur über die Landes-GVFG gefördert werden, sofern es in diesen als Fördertatbestand enthalten ist. In den Landes-GVFG ist dabei die HO-Bus-Infrastruktur zumeist nicht konkret genannt, daher bestehen hinsichtlich des Fördertatbestandes Unsicherheiten bzw. dieser ist von einer Einzelfallprüfung abhängig. Beispiele hierfür sind die Umsetzungen in Baden-Württemberg (BW) und in Nordrhein-Westfalen (NRW):

- **BW:** Förderung für Straßenbahn gilt auch für Verkehrsmittel, „die einen vergleichbaren verkehrlichen Nutzen erbringen“ (LGVFG-BW, in der ab dem 19.11.2015 gültigen Fassung, §2¹⁸).
- **NRW:** „ÖPNV-Investitionsmaßnahmen, für die das besondere Landesinteresse im Einzelfall vom für das Verkehrswesen zuständigen Ministerium im Einvernehmen mit dem

¹⁷ 40% der zuwendungsfähigen Ausgaben (Neufahrzeuge) von bei Gelenkbussen max. 340 T€, Zuschläge auf zuwendungsfähigen Ausgaben bei E-Bus + 70 %

¹⁸ <http://www.landesrecht-bw.de/jportal/?quelle=jlink&query=GVFG+BW&max=true&aiz=true>, zuletzt abgerufen am 14.12.2015

Verkehrsausschuss des Landtags festgestellt wurde.“ (ÖPNVG NRW, Stand 9.12.2015 , §13¹⁹)

Abweichend dazu sind in in der Thüringer ÖPNV-Investitionsrichtlinie konkret Elektrobusse „...sowie diesbezügliche Investitionen in die Infrastruktur“ (ÖPNV-Investitionsrichtlinie 2015, 2.3 [MIL Thüringen, 2015]) als förderfähig genannt. Die Fördersätze bewegen sich zwischen 50 und 90 %. Eine Förderung der Infrastruktur von 80 % (wie z.B. in Thüringen) würde die Lebenszykluskosten von Hybrid-Oberleitungsbussen im Untersuchungsfall und im 10-Minuten-Takt um 0,22 ct/Platz-km senken. Damit würden sich die Mehrkosten der Kommune gegenüber den Diesibus von 22 % auf 13 % reduzieren.

8.2 Städtebauliche Hemmnisse – Erkenntnisse aus dem Fachworkshop

Die städtebauliche Integration der Oberleitungsinfrastruktur ist ein kontroverser Aspekt bei der Diskussion um die Wiedereinführung von O-Bussen (siehe Kapitel 3.1). Um die subjektiv geprägte Diskussion zu objektivieren, fand am 27. Oktober in Berlin der Fachworkshop „Der Hybrid-Oberleitungsbus – wirtschaftliche Möglichkeiten und ästhetische Herausforderungen für die Elektrifizierung des städtischen Busverkehrs“ statt. Geladen waren Experten aus Deutschland, Österreich und der Schweiz. Eine Dokumentation des Workshops ist mit [BMVI, 2015b] erfolgt. In dem Workshop wurde geschlossen, dass die geringe Akzeptanz entscheidend durch ein altes Bild von Oberleitungsbussen geprägt ist. Wesentliche Aspekte dieses Bildes sind dabei der hohe Infrastrukturbedarf sowie die veraltete Fahrzeugtechnologie zum Zeitpunkt der Abschaffung vieler deutscher Systeme in den 1980er Jahren.

Während die aktuell eingesetzte O-Busgeneration bereits den gleichen Fahrgastkomfort wie Diesibusse bietet, ist mit der HO-Bustechnologie eine deutliche Reduktion der Infrastruktur möglich. Für die städtebauliche Integration ist dabei insbesondere die Möglichkeit interessant, kritische Orte (z.B. historische Innenstädte) oberleitungsfrei zu gestalten. Zusammen mit modernen Gestaltungsmöglichkeiten, wie z.B. die Integration von Oberleitungsmasten und Beleuchtung, sind die städtebaulichen Herausforderungen laut der am Workshop teilnehmenden Vertreter des VDV und des Deutschen Städtetags²⁰ gut lösbar. Bei der Platzierung der Oberleitungen sind neben den städtebaulichen Aspekten jedoch auch wirtschaftliche Aspekte zu beachten. Wesentlich für die Wirtschaftlichkeit ist dabei, neben den Errichtungskosten, der Ausnutzungsgrad der Oberleitung. Der Ausnutzungsgrad ergibt sich dabei aus der Zeit, die Fahrzeuge unter einem Oberleitungsabschnitt zum Laden verbringen. Daher bietet sich insbesondere die Platzierung an Linienendpunkten, aber auch Langsamfahrstellen und Stellen, wo sich Linien Bündeln, als Orte für Oberleitungen an. Insbesondere letzteres ist oft in den (historischen) Kernstädten der Fall, so dass sich hier ein Zielkonflikt zwischen städtebaulichen und wirtschaftlichen Aspekten ergeben kann.

Neben der Diskussion über die objektive Relevanz der städtebaulichen Herausforderung war ein weiteres zentrales Thema, wie man das skizzierte alte Bild vom (H)O-Bus durch ein moderneres Bild ersetzen könnte.

¹⁹ https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_bes_text?anw_nr=2&gld_nr=9&uql_nr=93&bes_id=3913&aufgehoben=N#det275297, zuletzt abgerufen am 14.12.2015

²⁰ Martin Schmitz (VDV) und Thomas Kiel (Deutscher Städtetag)

Die Diskussion ist in [BMVI, 2015b] zusammengefasst. Folgend ist eine Auswahl der wesentlichen Punkte dargestellt:

- *„Es gibt viele gute Beispiele im Ausland, wo Oberleitungen durch schlankes Design und intelligente Kombination mit der Straßenbeleuchtung kaum noch sichtbar sind. Ein Simulationstool, das moderne Oberleitungen in einem Straßenzug visualisiert, könnte auch Entscheidungsträgern die Angst vor Protesten nehmen.*
- *Auch die Positionierung des Fahrzeuges in der Wahrnehmung ist wichtig. Hier können heute über entsprechende Designs Assoziationen mit Straßenbahnen (als bekanntes, hochwertiges ÖPNV-Verkehrsmittel) geweckt werden.*
- *Die Hoffnung, der batterieelektrische Bus könne bereits in naher Zukunft ähnlich flexibel gefahren werden wie ein Diesibus, hemmt vielerorts die öffentliche Debatte über HO-Busse. Es müssen daher die Vorteile des HO-Busses zur nachhaltigen Stadtentwicklung und die Grenzen der Batterieentwicklung deutlich aufgezeigt werden.*
- *Wie bei vielen Infrastrukturprojekten braucht es auch zur Einführung von HO-Bussen eine professionelle Kommunikationsstrategie. Die Oberleitung kann auch als positives Zeichen für den ÖV in der Stadt gesehen werden, wie dies zum Teil auch bei Straßenbahnen der Fall ist. Eine frühzeitige Einbindung der Anwohner ist wichtig.“ [BMVI, 2015b]*

8.3 Hemmnisse in den Verkehrsbetrieben

Für die Verkehrsbetriebe bedeutet der Umstieg auf Elektrobusse Veränderungen durch:

- komplexere Betriebsabläufe aufgrund des Vorhandenseins mehrerer unterschiedlicher Antriebssysteme. Busse können nicht so flexibel disponiert werden, wie es bei einer reinen Diesibusflotte der Fall ist, zudem sind Zusatzqualifikationen der Fahrer zu beachten. Außerdem bedeutet das Vorhandensein mehrerer Antriebssysteme auch höhere Aufwände in der Werkstatt und beim Werkstattpersonal (spezielle Arbeitsstände und Mitarbeiter für Wartung der HO-Busse) sowie einen höheren Aufwand in der Ersatzteilhaltung.
- Veränderte Anforderungsprofile an die Mitarbeiter und somit ein umfangreicher Weiterbildungsbedarf bei einer tendenziell älteren Mitarbeiterschaft in den meisten kommunalen Verkehrsunternehmen erschweren eine Umstellung auf elektrische Bussysteme. Hier sind entsprechend langfristige Planungen notwendig, um die Mitarbeiterschaft mitnehmen zu können. Sollen neue Mitarbeiter für die Wartung der HO-Busse eingestellt werden, z.B. ausgebildete Mechatroniker, herrscht eine Konkurrenzsituation insbesondere mit der Automobilwirtschaft, die in der Regel deutlich höhere Löhne zahlen kann als die Verkehrsunternehmen.
- Verkehrsunternehmen beziehen ihre Busse häufig von zwei Herstellern. Dies ist ein Kompromiss zwischen den Aspekten Losgröße (und damit verbundenen Preisnachlässen) und Abhängigkeit von einem Hersteller. Dabei sind die Beziehungen zwischen den Herstellern und den Verkehrsunternehmen zumeist recht fest, Herstellerwechsel finden eher selten statt. Dies ist insofern ein Hemmnis zum Einsatz des HO-Busses, da nur einer der Hersteller mit relevantem Marktanteil in Deutschland HO-Busse im Programm führt (Solaris mit 13%

Marktanteil in 2013). Würden mehr relevante Hersteller HO-Busse führen, ist zudem mit einem Sinken der Marktpreise gegenüber der heutigen Marktsituation zu rechnen.

- Der HO-Bus baut zwar auf erprobter Technologie auf, für einzelne Komponenten (Traktionsbatterien, Energiemanagement) liegen jedoch noch keine Langzeiterfahrungen vor.

Wesentlich für die Bedeutung dieser Hemmnisse sind dabei die Bereitschaft und die Ressourcen des Verkehrsunternehmens lokal angepasste Lösungen zu erarbeiten. Dem VDV kommt dabei eine zentrale Rolle in der Vernetzung der Verkehrsunternehmen (auch mit den Herstellern) und in der Bereitstellung von Wissen zu. Die im Workshop ausgedrückte positive Haltung des VDV zum HO-Bus für stark frequentierte Linien mit hohem Verkehrsaufkommen ist daher ein erster Schritt zum Abbau der oben dargestellten Hemmnisse [BMVI, 2015b].

8.4 Handlungsempfehlungen zum Abbau der Hemmnisse

Auf Basis der in Kapitel 8 zusammengefassten Hemmnisse sowie der Erkenntnisse aus den beiden MKS HO-Bus Workshops im BMVI werden in diesem Kapitel Handlungsempfehlungen dargestellt, um das Umweltentlastungspotenzial von HO-Bussen zu aktivieren. Ein Fokus liegt dabei auf den Handlungsmöglichkeiten des Bundes.

Befreiung von in Elektrobussen eingesetztem Strom von der Stromsteuer und von der EEG-Umlage

Die Lebenszyklusmehrkosten von Elektrobussen gegenüber Dieseln sind über günstigere Kosten für Strom bzw. höhere Kosten für Dieselmotoren gesenkt werden. Die derzeitige Situation der Belastung der Energieträger im ÖPNV mit Steuern und Abgaben ist folgendermaßen:

- Diesel im ÖPNV ist von der Energiesteuer befreit.
- Demgegenüber fallen für Strom sowohl Stromsteuer als auch Umlagen im Rahmen des Erneuerbaren Energie Gesetzes (EEG) an.

Es wird empfohlen, dass der Bund den in Elektrobussen eingesetzten Strom sowohl von der Stromsteuer und als auch von der EEG-Umlage befreit. Eine Abschaffung von Steuern und Abgaben auf im ÖPNV verwendeten Strom analog der bestehenden Energiesteuerbefreiung des ÖPNV auf Mineralölprodukte würde die Lebenszyklusmehrkosten eines von 2015 – 2027 eingesetzten Hybrid-Oberleitungsbusses um 0,11 ct/ Platz-km senken (Reduktion der Mehrkosten im Untersuchungsfall, 7,5 Minuten-Takt um 28 %).

Die Befreiung von im ÖPNV eingesetzten Diesel ist derzeit aus ökologischer Sicht zu vertreten, da mittels der Verlagerungswirkung vom MIV eine deutliche Reduktion von Luftschadstoffen und THG-Emissionen auch bei der Verwendung von fossilen Kraftstoffen erreicht werden kann. Langfristig sollte jedoch auch der ÖPNV seinen Anteil an der Dekarbonisierung des Verkehrssektors leisten, so dass die Wiedereinführung der Besteuerung von Diesel empfohlen wird. Diese könnte damit auch zur Refinanzierung der Steuerausfälle durch den Wegfall der Stromsteuer auf den in den Elektrobussen verwendeten Strom dienen. Die Anwendung des vollen Steuersatzes auf Diesel würde die Kosten für Dieseln um ca. 0,02 Cent/km (bezogen auf 2015) erhöhen und damit die Mehrkosten des HO-Busses um weitere fünf Prozentpunkte reduzieren. Um den Verkehrsunternehmen Planungssicherheit zu geben, sowie die Möglichkeit, sich auf die veränderten Randbedingungen einzustellen, sollte die

Wiedereinführung der Energiesteuer auf Diesel einige Jahre im Voraus angekündigt sein sowie schrittweise erfolgen.

Förderung von Pilotprojekten zum Neuaufbau eines HO-Bussystems

Die Akzeptanz bei den Nutzern bzw. den Bürgern wird beeinträchtigt durch ein altes Bild von Oberleitungsbussen, insbesondere durch den hohen Infrastrukturbedarf sowie der veralteten Fahrzeugtechnologie zum Zeitpunkt der Abschaffung vieler deutscher Systeme in den 1980er Jahren. Durch die Hybrid-Oberleitungstechnologie kann auf besonders störende Oberleitungsabschnitte verzichtet werden, zudem existieren neue Lösungen zur besseren städtebaulichen Integration.

Von Beginn an als Hybrid-Oberleitungsbussysteme geplante Pilotprojekte, die vom Bund gefördert werden könnten, sollten daher insbesondere den deutlichen Entwicklungsschritt bei den Möglichkeiten der städtebaulichen Integration gegenüber dem klassischen Oberleitungsbus aufzeigen und diesen über Marketingkampagnen, z.B. über Broschüren, an interessierte Bürger und Kommunen kommunizieren. Pilotprojekte können darüber hinaus helfen, bei Kommunen und Betrieben Unsicherheiten über die Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Hybrid-Oberleitungsbusse zu reduzieren sowie weitere Hersteller motivieren, dieses Antriebskonzept in ihr Angebot aufzunehmen.

Förderung der Fahrzeugmehrkosten

Für einen Übergangszeitraum ist eine zusätzliche Förderung der Fahrzeugmehrkosten gegenüber dem Dieselbus, wie in der bereits überzeichneten Elektromobilitätsrichtlinie enthalten, zu empfehlen. Eine Förderquote von 40 % auf die Fahrzeugmehrkosten würde die Lebenszykluskosten im Untersuchungsfall um 0,08 ct/ Platz-km senken. Dabei ist auf ein abgestimmtes Vorgehen mit den Ländern zu achten, die teilweise ebenfalls Förderung für Mehrkosten von Elektrobussen anbieten.

Gleichberechtigung von HO-Bus und Straßenbahninfrastruktur in der Finanzierung erwirken

Neben den Lebenszykluskosten wirkt sich die Finanzlage der Kommunen insbesondere auf die Fähigkeit aus, die für den Hybrid-Oberleitungsbus notwendigen (im Vergleich mit den anderen Elektrobuskonzepten höheren) Anfangsinvestitionen zu tragen. Die für den HO-Bus benötigten Investitionen liegen dabei in einer Größenordnung, die zum großen Teil von den Ländern finanziert wird. Der Bund sollte hier auf eine Gleichstellung von Elektrobusinfrastruktur mit Straßenbahninfrastruktur in den entsprechenden Ländergesetzen hinwirken, soweit eine Gleichbehandlung noch nicht existiert.

Forschungsförderung bereitstellen

Eine Herausforderung der Energiewende ist die Integration fluktuierender erneuerbarer Energien, bei der der HO-Bus sowohl Herausforderungen als auch Chancen bietet. Zudem sind Synergien mit weiteren Formen der Elektromobilität im Detail zu untersuchen. Weiterhin besteht Forschungsbedarf hinsichtlich energiesparender Heizungs- und Klimatisierungssysteme von Elektrobussen.

9 Potential des HO-Busses

Das Potential des HO-Busses wird zum einen durch die Treiber hin zur Elektrifizierung bestimmt, zum anderen durch die Wirtschaftlichkeit gegenüber dem Dieselbus sowie anderen Elektrobusskonzepten. Eine Gewichtung der Treiber und der Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit ist dabei ohne sektorspezifische Ziele nicht möglich, so dass die beiden Aspekte nachfolgend getrennt dargestellt werden.

9.1 Städte mit besonderen Treibern zur Elektrifizierung

Zwar kann durch den konsequenten Einsatz von Diesel Euro 6-Bussen der ÖPNV schon heute seinen Anteil an den in vielen Städten auftretenden Überschreitungen der PM₁₀- und NO₂- Grenzwerte reduzieren. Der Beitrag zur Lärmreduktion ist jedoch gering. Elektrobusse sind gegenüber Dieseln bei Vorbeifahrt um etwa 5 dB(A) leiser und sind frei von Luftschadstoffemissionen vor Ort. Diese lokalen Vorteile (Luftqualität, Lärm) sind für Kommunen zentrale Treiber hin zu Elektrobussen, (strategische) Aktionspläne bzw. Verkehrsentwicklungspläne bieten dabei konkreten Anlass zur Diskussion über Elektrifizierung. Die Städte mit den größten Luftqualitätsproblemen in Deutschland bezüglich der regulierten Luftschadstoffe sind in Tabelle 31 und Tabelle 32 dargestellt.

Tabelle 31: PM₁₀ Überschreitungen 2014, nur Verkehrs-Stationen, nur jeweils die Station mit der höchsten Überschreitung je Stadt

Name / Messnetz	Jahresmittelwert in µg/m ³	Zahl der Tageswerte > 50 µg/m ³
Stuttgart (Am Neckartor)	38	64
Berlin (Friedrichshain-Frankfurter Allee)	32	48
Frankfurt (Oder) (Leipziger Str.)	31	45
Leipzig (Lützner Str. 36)	30	43
Halle (Paracelsustr.)	33	41

Tabelle 32: NO₂ Überschreitungen 2014, nur Verkehrs-Stationen, nur jeweils die Station mit der höchsten Überschreitung je Stadt

Name / Messnetz	Jahres-mittelwert in µg/m ³	Zahl der Stundenwerte > 200 µg/m ³
Stuttgart (Am Neckartor)	89	36
München (Landshuter Allee)	83	24
Düren (Euskirchener Straße)	64	---
Kiel (Theodor-Heuss-Ring)	64	11
Limburg (Schiede 28-30)	63	---

Zudem sind die niedrigeren THG-Emissionen (bei fortschreitender Energiewende bzw. beim Einsatz von erneuerbarem Strom) auch auf kommunaler Ebene ein Aspekt, der für den Einsatz von Elektrobussen spricht und der u.a. in Klimaschutzplänen adressiert wird. Neben der Verdrängung von

Dieselbussen kann dabei ein zusätzlicher positiver Umwelteffekt erzielt werden, wenn die Elektrobusse als ein höherwertiges Verkehrsmittel wahrgenommen werden, wie es z.B. mit den O-Bussen in Zürich der Fall ist [BMVI, 2015b], und daher auch eine Verlagerung weg vom MIV erzielt wird. Ein besonders starkes Engagement für den Klimaschutz besteht dabei z.B. in den Masterplan-Kommunen, die sich zu einer Reduktion ihre Treibhausgasemissionen bis 2050 um 95 % gegenüber 1990 verpflichtet haben, sowie ihren Verbrauch an Endenergie in diesem Zeitraum zu halbieren. Derzeit existieren 19 Masterplan-Kommunen²¹.

9.2 Städte mit besonderer wirtschaftlicher Eignung für HO-Bus-Systeme

Dabei stehen insbesondere die Mehrkosten der Elektrobusse gegenüber dem Dieselbus der Realisierung von HO-Bussen entgegen. Diese sind in der Regel eher von großen Kommunen zu tragen, in welchen auch eher eine, die Wirtschaftlichkeit des HO-Busses steigende, hohe Nachfrage im ÖPNV zu erwarten ist. Konkret hängt die Wirtschaftlichkeit des HO-Busses insbesondere davon ab,

- ob auf vorhandene Infrastruktur zurück gegriffen werden kann, also insbesondere Synergien mit Straßenbahnen bestehen oder
- ob eine hohe Auslastung der Oberleitungs-Infrastruktur (hohe Taktfrequenz, hohe Gefäßgröße) erreicht werden kann.

Für den zweiten Punkt sind, neben der Stadtgröße (ca. 30 000 Einwohner werden als untere Grenze gesehen), die weiteren Faktoren

- Wirtschafts- und Siedlungsstruktur,
- Netzstruktur und gegenwärtiges Niveau des ÖPNV
- topografischen und klimatischen Gegebenheiten und
- prognostizierten demografischen Veränderungen

relevant. [Haase, 2007]

Neben den Vorteilen der Mitnutzung der Straßenbahninfrastruktur ist diese aber auch Konkurrenz im Einsatzbereich von Linien mit sehr hoher Auslastung. In dem Kapazitätsbereich wo sowohl HO-Doppelgelenkbusse als auch Straßenbahnen eingesetzt werden können, hat der HO-Bus signifikante Kostenvorteile aufgrund der deutlich geringeren Investitionskosten [BMVI, 2015b].

²¹ <http://www.bmub.bund.de/presse/pressemitteilungen/pm/artikel/19-kommunen-gewinnen-bmu-foerderpreis-masterplan-100-klimaschutz/> , zuletzt aufgerufen am 15.12.2015



Abbildung 26: Hess LighTram3 in Zürich, von Micha L. Rieser (Own work) [CC BY-SA 3.0]²²

Werden die Kapazitäten von Doppelgelenkbus (24 m Länge, 185 Plätze) und Straßenbahn (45 m Länge, 260 Plätze) auf den Untersuchungsfall bezogen, ergeben sich die in Abbildung 27 dargestellten Kurven.

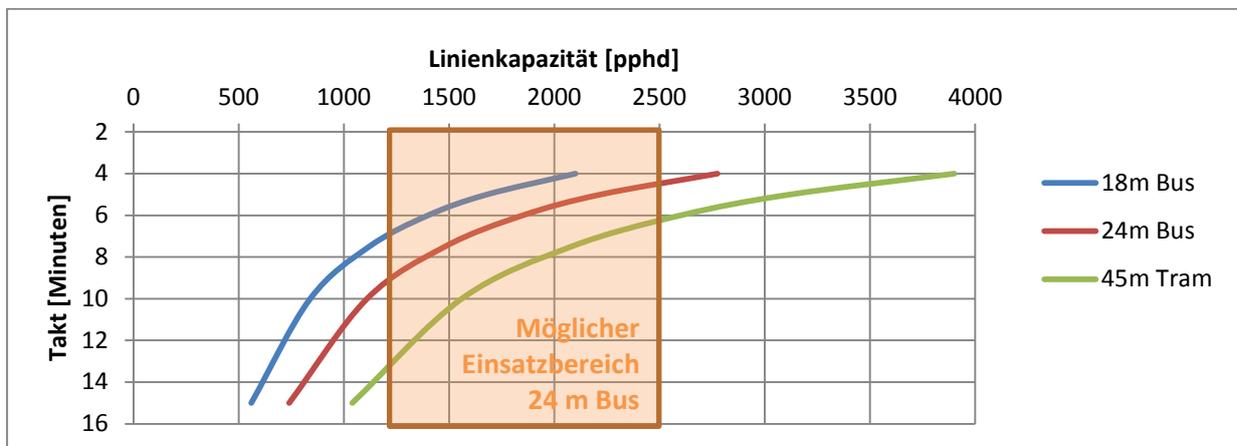


Abbildung 27: Linienkapazitäten verschiedener ÖPNV-Gefäßgrößen und –Systeme in Abhängigkeit des Taktes

Dabei ist zu beachten, dass die Taktfrequenz sinnvollerweise nicht deutlich über einen 5 Minuten Takt hinaus gesteigert werden sollte, da bei kleineren Takten

- zum einen die Tendenz zur Pulkbildung stark zunimmt und
- zum anderen die Fahrerkosten gegenüber größeren Einheiten

²² <https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ALighTram3-Linie-31-Z%C3%BCrich-Bild-2.jpg>

überproportional steigen. Daher erscheint der HO-Doppelgelenkbus unter den Bedingungen des Untersuchungsfalles im Kapazitätsbereich zwischen etwa 1200 und 2500 pphd eine sinnvolle Alternative zur Straßenbahn zu sein.

9.3 Zusammenfassung Potential HO-Bus

Zusammenfassend wird der Einsatzbereich des HO-Busses in Kommunen gesehen, auf die mehrere der folgenden Punkte zutreffen:

- Städte mit existierender oder geplanter E-Infrastruktur (z.B. Netzergänzung von Städten mit Stadt- oder Straßenbahnen bzw. Kombination von Schnellladeinfrastruktur für Kfz)
- Städte mit geeigneten Linien (niedrige Taktzeiten, hohe Gefäßgrößen)
- Städte, in denen eine zentrale Achse des Busnetzes existiert (Linienbündel), die sich besonders einfach elektrifizieren lässt
- Städte mit besonderen Herausforderungen bezüglich Luftschadstoffen
- Städte die Vorreiter im Klimaschutz sein wollen

Da sich für viele Städte in Deutschland große Schnittmengen dieser Punkte erkennen lassen, wird dabei ein relevantes Einsatzpotential für den HO-Bus gesehen. Damit könnte die HO-Bus-Technologie einen wesentlichen Teil einer Strategie zur kompletten Elektrifizierung des Linienbusverkehrs in Deutschland darstellen.

Literaturverzeichnis

- Achilles, L. (2008): Verkehrsgeschichte(n) vom Hamburger Nahverkehr.
- AG Energiebilanzen (2015): Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern.
- Basile, R. (2013): Herausforderungen an Klimatisierungs- und Heizungslösungen bei Fahrzeugen mit Elektroantrieb. pp. 1–8.
- Björklund, S. / Soop, C. / Rosenqvist, K. / Ydstedt, A. (2000): New Concepts for Trolley Buses in Sweden. Malmö, Sweden.
- BMVI (2015a): Fachworkshop: HO-Bus - Ein Beitrag zur Gestaltung der Energiewende im Verkehrssektor oder Techniknostalgie ?
- BMVI (2015b): Fachworkshop: HO-Bus - Wirtschaftliche Möglichkeiten und ästhetische Herausforderungen für die Elektrifizierung des städtischen Busverkehrs. <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/MKS/mks-fachworkshop-hybrid-oberleitungsbusse.html>.
- Bormann, R. / Bracher, T. / Duemmler, O. / Duenbier, L. / Haag, M. / Holzapfel, H. / Kunst, F. / Mietzsch, O. / Mirbach, J. / Mossakowski, H. / Ubbelohde, J.-H. / Werner, J. / Zoubek, H. (2010): Neuordnung der Finanzierung des Oeffentlichen Personennahverkehrs.
- Brandt, A. (2009): Converting Oil Shale to Liquid Fuels with the Alberta Taciuk Processor: Energy Inputs and Greenhouse Gas Emissions. In: *EnergyFuels*. Vol. 23, pp. 6253–6258.
- Bundesregierung (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin.
- Bundesregierung (2013): Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS).
- Bundesverband Erneuerbare Energien (2015): Beitrag der Erneuerbaren Energien im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor im 1. Halbjahr 2015.
- Burmeister, J. (2013): Der Filobus kehrt in die italienischen Städte zurück. In: *Nahverkehrspraxis*. No.1, pp. 14–16.
- Delft, C. E. (2013): Zero emissions trucks An overview of state-of-the-art technologies and their potential.
- Deutsch, V. (2003): Einsatzbereiche neuartiger Transportsysteme zwischen Bus und Bahn. Bergische Universität Wuppertal.
- DLR / IWES / IfnE (2012): Leitstudie 2011 - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global.
- Duflou, J. R. / De Moor, J. / Verpoest, I. / Dewulf, W. (2009): Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Vol. 58, No.1,

pp. 9–12.

Ebrahimi, B. E. (2014): Life Cycle Assessment of High Speed Rail Electrification Systems and Effects on Corridor Planning. NTNU Trondheim.

Elgowainy, A. / Reddi, K. / Wang, M. (2013): Life-Cycle Analysis of Hydrogen On-Board Storage Options. In: *Argonne National Laboratory*. http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review13/an034_elgowainy_2013_o.pdf.

Ewi / GWS / Prognos (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energierferenzprognose.

FH ISI (2013): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge. NPE. http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/e/projekte/npetco_316741_plp.php.

Fralalocchi, A. (2012): How a small city renewed the trolleybus service: the case of Ancona. Presentation during the ASSTRA Workshop, Parma, May 2012.

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (2015): Stromerzeugung aus Solar- und Windenergie im ersten Halbjahr 2015.

Gavrilova, O. / Vilo, R. / Vallner, L. (2010): A life cycle environmental impact assessment of oil shale produced and consumed in Estonia. In: *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 55.

H2Gen (2007): Specifications HGM.

Haase, R. (2007): Für eine Renaissance des O-Busses. In: *Internationales Verkehrswesen*. Vol. 59, No.5.

Haase, R. (2012): Neue Horizonte im Stadtverkehr. In: *Internationales Verkehrswesen*. Vol. 4, No.64, pp. 66–67.

Habermacher, F. / Althaus, H.-J. (2011): Modeling Material Inventories and Environmental Impacts of Electric Passenger Cars - Comparison of LCA results between electric and conventional vehicle scenarios. In: *Dep. of Environmental Sciences*. Vol. Master, p. 94.

Heer, D. / Bärsch, A. / Kokot, T. (2013): Trolleybus Luzern: Trolleybusstrategie. Luzern, Schweiz.

Huober, W. (2008): Der Obus heute. <<http://www.vossloh-kiepe.com/elektrobusse/vkproduktordner.2008-06-15.5305035969/der-obus-heute>> (Jul. 31, 2015).

ifeu (2011): Umbrella: Umweltbilanzen Elektromobilität - Grundlagenbericht. Wissenschaftlicher Grundlagenbericht gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. H. Helms, J. Jöhrens, J. Hanusch, U. Höpfner, U. Lambrecht, M. Peht. Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg. <http://www.emobil-umwelt.de/>.

ifeu (2014): Aktualisierung „Daten - und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960- 2030“ (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Heidelberg.

- ifeu (2015a): Protokoll des Fachworkshops Hybrid-Oberleitungsbusse – Ein Beitrag zur Gestaltung der Energiewende im Verkehrssektor oder Techniknostalgie? in Berlin am 11. März 2015. <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/MKS/mks-fachworkshop-hybrid-oberleitungsbusse.html>.
- ifeu (2015b): Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Institut für Energie und Umweltforschung. im Auftrag des Umweltbundesamtes. In Druck., Heidelberg.
- ifeu / TU Graz (2015): Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) und Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Forschungskennzahl 3711 96 105. Dessau-Roßlau, April 2015.
- International Energy Agency (2013): world energy outlook.
- IPCC (2007): Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf. www.ipcc.ch.
- JEC (2014): WELL-TO-WHEELS Report Version 4.a. Technical Report for the European Commission. Joint Research Centre (JRC), EUCAR, Concawe.
- Korolkov, S. / Andersson, P. G. / Backhaus, W. / Haskins, D. (2015): How To Build and Operate an Efficient Trolleybus System.
- Kudlicza, P. (2009): Der Obus erlebt eine Renaissance. In: *VEÖ Journal*. Vol. JÄN, pp. 1–5.
- Kuusik, R. (2012): CO2 mineralization - option for abatement of CO2 emissions at Estonian oil shale processing?
- Lehmann, J. (2013): Der Obusbetrieb in Rheydt 1952-1973. <<http://obus269.homepage.t-online.de/s400rhey.htm>> (Jul. 31, 2015).
- Lehmann, J. (2015a): Obusse in der Epoche 3.
- Lehmann, J. (2015b): Auf oder Abgehängt? – Die Entwicklung im Obus-Sektor. <http://www.trolley-motion.eu/www/verwaltung/de/argumente/auf_ab.htm>.
- Maaß, C. / Waluga, G. / Weyland, R. (2015): Fahrscheinlos - Grundlagen- und Machbarkeitsstudie Fahrscheinloser ÖPNV in Berlin.
- Mackinger, G. (2014): Der O-Bus – ein verlässlicher Partner. In: *4. Internationale E-Bus-Konferenz*. Hamburg.
- McKinsey (2012): Urban buses : alternative powertrains for Europe.
- MIL Thüringen (2015): ÖPNV-Innovationsrichtlinie.
- Müller, R. (1995): Die deutschen Obusbetriebe von 1930 bis 1995. <<http://www.solingen-internet.de/si-hgw/bus+post.htm>> (Oct. 13, 2015).
- MVI Baden-Württemberg (2014): Straßenverkehrslärm - Leitfaden für Lärmschutz in Städten und

Gemeinden.

MVI Baden-Württemberg (2015): Elektro- und Hybridbusse im ÖPNV.

Neumann, P. (2009): An der Strippe. Eberswalde hält am Obus-Verkehr fest und kauft zwölf neue Fahrzeuge. In: *Berliner Zeitung*.

Öko-Institut (2009): Renewbility: Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030 - Teil 1: Methodik und Datenbasis. Berlin.

Öko-Institut (2011): Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), version 4.7.

Prognos (2010): Studie Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung.

Pütz, R. (2010): Strategische Optimierung von Linienbusflotten.

Pütz, R. / Haberstock, T. (2015): Messungen von Elektrobussen der Hersteller Solaris, BYD, Ebusco, Ebus Europa, VDL auf ebenen Linien im Sommer und Winterbetrieb auf unterschiedlichen Stadtlinien in München, Bremen und Landshut.

Quian, J. / Wang, J. (2006): World oil shale retorting technologies.

Rieberer, R. et al. (2015): Energieeffiziente Enteisierung bei PKW-Wärmepumpensystemen. In: *ATZ*. pp. 40–43.

Rogge, M. / Wollny, S. / Sauer, D. (2015): Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport—A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements. In: *Energies*. Vol. 8, No.5, pp. 4587–4606.

Rutscher, S. (2015): Das Trolleybusssystem in Eberswalde. [https://files.ifok.de/gf/MKS_\(Hybrid\)Oberleitungsbusse_11.3.2015_Vortraege.zip](https://files.ifok.de/gf/MKS_(Hybrid)Oberleitungsbusse_11.3.2015_Vortraege.zip).

Sabanov, S. / Sokman, K. (2008): Technological and Environmental Aspects of Assessment of a Combination of Different Mining Methods Used in Estonian Oil Shale Industry. In: *Oil Shale*. Vol. 25, No.2 Special, pp. 163–173.

Salman, O. / Chen, Y. (2013): Comparative Environmental Analysis of Conventional and Hybrid Wheel Loader Technologies - A Life Cycle Perspective.

Schaden, H. / Mackinger, G. (2004): Positionspapier Trolleybus. Betreffend die EU-Verordnung zur Vergabe öffentlicher Dienstleistungsaufträge im Personenverkehr.

Scherr, C. (2015): Elektrochemisches Verhalten von Lithium-Schwefel-Zellen mit unterschiedlicher Kathodenstruktur. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe.

Schmied, M. / Mottschall, M. / Kappus, J. / Klußmann, A. / Hecht, M. / Eschweiler, P. (2013): Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie und Steigerung der Energieeffizienz im öffentlichen Personennahverkehr.

Schnell, P. / Retzke, C. (2010): Total Deutschland: Aktivitäten und Planungen zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur.

Schweizer, F. (2006): Plädoyer für den Trolleybus. In: *Üsi Meinig, Mitteilungsblatt des VCS und WWF*

- Schaffhausen*. Vol. 1, pp. 14–17.
- Sonnekalb, M. (2006): Messen und Messtechnik in Bus-Klimaanlagen. pp. 1–11.
- Spousta, J. / Németh, Z. Á. / Wolek, M. / Weiß, A. / Chick, D. G. (2013): Trolleybus Intermodal Compendium.
- Stadtbuss Winterthur (2013): Der Trolleybus fährt seit 75 Jahren. Eine Erfolgsgeschichte. In: *Stadtbuss Aktuell*. Winterthur.
- SVE (2015): Geschichte der Städtischen Verkehrsbetriebe Esslingen: 1950-1959. SVE (Städtische Verkehrsbetriebe Esslingen). <http://www.sve-es.de/Lde/start/SVE/1950+_+1959.html>.
- Tica, S. / Filipović, S. / Živanović, P. / Bajčetić, S. (2011): Development of Trolleybus Passenger Transport Subsystems in Terms of Sustainable Development. In: *International Journal for Traffic and Transport Engineering*. Vol. 1, No.4, pp. 196–205.
- TNO (2014): NOx and PM emissions of a Mercedes Citaro Euro VI bus in urban operation.
- Trolley-motion (2014): Esslingen: City-News Archiv. <http://www.trolley-motion.eu/www/index.php?id=38&L=0&n_ID=2107> (Jul. 31, 2015).
- Trolley-motion (2015a): Die Geschichte des Trolleybus. <<http://www.trolley-motion.eu/www/index.php?id=44>> (Jul. 31, 2015).
- Trolley-motion (2015b): Esslingen [DE] - Erster Batterie-/Obus eingetroffen. <http://www.trolley-motion.eu/www/index.php?id=38&L=0&n_ID=2389>.
- Trolley-motion (2015c): Liste aller Trolleybusstädte. <<http://www.trolley-motion.eu/www/index.php?L=0&id=36&land=all>>.
- UBA (2013): Position: Kurzfristig kaum Lärminderung durch Elektroautos. Dessau-Roßlau. http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/position_kurzfristig_kaum_laerminderung_im_verkehr.pdf.
- VBSG (2007): Die Verkehrsbetriebe St. Gallen. Trolleybus: Ja oder Nein?
- VCDB (2010): SAXHYBRID - schnellladefähige Hybridbusse im Linienbetrieb; Fachforum Sachsen-Modellregion Elektromobilität.
- VDV (2014): Statistik 2014.
- VDV (2015): Busförderung in den Ländern Stand : Juni 2015.
- Vossloh Kiepe GmbH (2014): Modern e-bus propulsion systems 4 . International E-Bus-Conference in Hamburg Vossloh Kiepe.
- Wotek, M. / Wyszomirski, O. (2013): The Trolleybus as an Urban Means of Transport in the Light of the Trolley Project. Danzig.
- Zavada, J. / Zavada, J. B. / Miloš, K. (2010): Conditions for implementing trolleybuses in public urban transport. In: *Promet - Traffic & Transportation*. Vol. 22, No.6, pp. 467–474.

Zid, B. (2015): Ausbau der Elektromobilität - Projekt „ O-Bus 2020“ der Verkehrsbetriebe Solingen.
[https://files.ifok.de/gf/MKS_\(Hybrid\)Oberleitungsbusse_11.3.2015_Vortraege.zip](https://files.ifok.de/gf/MKS_(Hybrid)Oberleitungsbusse_11.3.2015_Vortraege.zip).

Anhang I: Ökobilanzdaten

Bestimmung der Umweltwirkungen der Fahrzeuge

Das Ökobilanzmodell basiert auf einem Grunddatensatz für einen Standard (12 m) -Dieselbus („bus production“) aus der anerkannten Ökobilanzdatenbank ecoinvent in der Version 3.1 [ecoinvent, 2014]. Es wird dabei bei allen direkten Herstellungsaufwendungen mit dem in Kapitel 6.3 dargestellten Strommix gearbeitet, also vereinfachend angenommen, dass die Herstellung komplett in Deutschland erfolgt. In den Hintergrunddaten von ecoinvent enthaltene Anteile für den Strom (z.B. zur Stahlherstellung) werden nicht angepasst, da hier von einer globalen Produktion ausgegangen wird. Nicht betrachtet werden konnte aufgrund fehlender Daten die Pantographen für den GL- und den HO-Bus. Es wird angenommen, dass aufgrund der geringen Masse im Vergleich zum Gesamtfahrzeug die Auswirkungen auf die Gesamtbilanz vernachlässigbar sind.

Basisfahrzeug

Um aus dem Grunddatensatz das Basisfahrzeug abzuleiten, ist der Verbrennungsantriebsstrang näherungsweise aus dem Grunddatensatz herauszurechnen, d.h. die entsprechenden Materialmengen werden aus der Materialbilanz abgezogen. Dafür werden folgende Annahmen getroffen:

- Es wird angenommen, dass ein Verbrennungsmotor für einen Bus zu 90% aus Gusseisen besteht und etwa 650 kg wiegt (bei einem Bus mit einem Leergewicht von 10,9 t).
- Zusätzlich werden für den Dieseltank 0,132 kg Polyethylen (HD) pro Liter Tankvolumen abgezogen, wobei der Dieseltank des Busses mit 10,9 t ein Gesamtvolumen von 280 Litern umfasst [ifeu, TU Graz, 2015].
- Weiterhin werden 43 kg Stahl für den nicht mehr benötigten Auspuff abgezogen.

Es wird angenommen, dass die Materialzusammensetzung des Basisfahrzeugs unabhängig vom Leergewicht gleich bleibt. Damit kann die Ableitung des Datensatzes für den Gelenkbus über eine Hochskalierung entsprechend des relativen Mehrgewichts des Gelenkbusses gegenüber dem Standardlinienbus erfolgen (17,2 t gegenüber 10,9 t).

Li-Ionen Akku

Die Modellierung der Batterien entstammt dem ifeu Ökobilanzmodell für Personenkraftwagen (eLCAR) wie es in [ifeu, 2015b] beschrieben ist. In eLCAR sind verschiedene Batterietypen bilanziert, die sich jeweils nach dem Aktivmaterial der Kathode unterscheiden: Nickel-Mangan-Kobalt-Zellen (NMC), Nickel-Kobalt-Aluminium-Zellen (NCA) und Lithium-Eisenphosphat-Zellen (LFP). Diese unterscheiden sich in der Energie- und Leistungsdichte sowie in den Kosten. Dabei weist LFP zwar eine geringere Energiedichte auf, hat aber Vorteile bei den Kosten. Als Anodenmaterial wird bei allen Batterien Graphit eingesetzt und als Elektrolyt kommt Lithiumhexafluorophosphat zum Einsatz. Für die Herstellung der Akkus werden Materialmengen und Energieeinsatz für die Produktion der Batteriezellen, des Gehäuses und des Batteriemanagement betrachtet. Dabei sinkt der Energiebedarf für die Herstellung in Zukunft proportional zur verarbeiteten Werkstoffmenge, da die Energiedichte steigt [ifeu, 2015b].

Es wird angenommen, dass für Busse dieselben Batterien wie für die Pkws zum Einsatz kommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass aufgrund der geringeren Kosten Lithiumeisenphosphat-Zellen mit Pouchgehäuse eingesetzt werden. Mehrere zusammengeschalteten Batteriezellen ergeben dabei größere Akkus.

Elektromotoren

Daten für den Elektroantrieb des Busses stammen aus [Habermacher, / Althaus, 2011]. [Habermacher, Althaus, 2011] bilanziert einen Elektromotor der Firma Brusa mit einer Leistung von 100 kW inklusive Konverter, Inverter, Energieverteilung und Ladeelektronik. Dieser Motor wird je nach erforderlicher Leistung skaliert. Eine Zusammenfassung der Herstellungsdaten des Elektroantriebes ist im Anhang dargestellt (**Materialtabellen - Fahrzeuge**

Tabelle 36).

Brennstoffzelle und Wasserstofftank

Die Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC) wird aus eLCAr [ifeu, 2011] übernommen. Die Material- und Energiebilanzen dieser Brennstoffzelle sind durch Geheimhaltung geschützt und können daher hier nicht gezeigt werden. Bilanziert wurde eine Brennstoffzelle der Firma Ballard Power Systems wie sie im Mercedes (F-Cell) und Ford (Focus FCV Hybrid) eingesetzt wurde. Dabei wurde die Platinbeladung angepasst und es wurde eine Optimierung der Brennstoffzelle vorgenommen, so dass die verwendeten Daten den Stand im Jahr 2030 abbilden [ifeu, 2011]. Die Brennstoffzelle wird anhand ihres Gewichtes skaliert, so dass im Jahr 2015 mehr Materialien als im Jahr 2025 für dieselbe elektrische Leistung benötigt werden.

Die Brennstoffzellenhybridbusse haben eine Tankgröße von 35 Kilogramm Wasserstoff. Dabei wird der Wasserstoff in 6 Wasserstoffdrucktanks mit einem Volumen von je 6 kg und bei einem Druck von 350 bar gespeichert. Der Wasserstofftank wird nach Literaturangaben von [Elgowainy, et al., 2013] modelliert und seine Materialzusammensetzung ist im Anhang dargestellt (Tabelle 37). Die Herstellung des für den Wasserstofftank verwendeten karbonfaserverstärkten Kunststoffes ist dabei in ecoinvent 3.1 nicht enthalten und wird aufbauend auf [Duflo, et al., 2009] modelliert.

Dieselbus inklusive Abgasnachbehandlung

In dem Grunddatensatz von ecoinvent fehlt die Bilanzierung der Abgasnachbehandlung der Dieselbusse, die für eine möglichst vollständige Betrachtung der Umweltwirkungen eine hohe Relevanz aufweisen. Für die Modellierung der Abgasnachbehandlung werden Daten aus [Salman, Chen, 2013] genutzt. Die hierin bilanzierte Abgasnachbehandlung eines Dieselradladers von Volvo mit einer Motorleistung von 220 kW ist ähnlich aufgebaut wie die eines Dieselbusse mit Oxidationskatalysator, Partikelfilter und selektive katalytische Reduktion (SCR). Dabei sind die

Sachbilanzdaten mit Originalmaterialnamen nach [Salman, / Chen, 2013] und den ausgewählten ecoinvent 3.1 Produktnamen sind im Anhang (Tabelle 38) zusammengefasst.

In ecoinvent ist kein Datensatz für die Herstellung von Cordiert (Katalysatorkeramik) verfügbar, weswegen hier mit Daten für eine andere Keramik gearbeitet werden muss. Aufgrund des geringen Anteils der Keramik an der Fahrzeugmasse von weniger als 1% wird die aus dieser Annahme entstehende Unsicherheit als vernachlässigbar angesehen.

Bei der Abgasnachbehandlung ist der Auspuff bereits enthalten, daher werden vom Basisfahrzeug 43 kg Stahl für den Auspuff abgezogen. Die Größe der Abgasnachbehandlung wird nach der Leistung des Dieselmotors skaliert.

Bestimmung der Umweltwirkungen der Energiebereitstellungsinfrastruktur

Oberleitungen inklusive Masten

Um eine erste Abschätzung der benötigten Oberleitungen zu ermöglichen, wird mit Daten aus [Ebrahimi, 2014] gearbeitet. Hier wird die Elektrifizierung einer Eisenbahnstrecke untersucht. Oberleitungsbusse können prinzipiell dieselben Oberleitungen wie Züge benutzen. Allerdings benötigen Oberleitungsbusse im Gegensatz zu Schienenfahrzeuge zwei Fahrdrähte.

Aus [Ebrahimi, 2014] werden die Aufwendungen für die Herstellung der Oberleitung (inklusive Masten, Oberleitungskabeln, Ausleger und Spannvorrichtungen) sowie deren Wartungsaufwendungen über die Lebensdauer von 60 Jahren übernommen und die Fahrdrahlänge verdoppelt. Das damit erhaltene zusammengefasste Sachbilanzinventar für einen Kilometer Oberleitung (inkl. verdoppeltem Fahrdraht) ist in Tabelle 35 dargestellt.

Unterwerke

Sowohl die Oberleitungsbusse, als auch die anderen beiden Elektrobusantriebe benötigen eine Stromversorgung über Unterwerke. Während Straßenbahnen und Oberleitungsbusse mit 600 bis 750 Volt Gleichspannung arbeiten, werden für Züge 15 kV Wechselspannung sowie deutlich höhere Leistungen je Fahrzeug benötigt. Insofern sind die Systeme nur eingeschränkt vergleichbar.

[Ebrahimi, 2014] gibt an, dass für Bau, Wartung und Entsorgung der Unterwerke für einen Kilometer Eisenbahninfrastruktur etwa 80.700 kg CO₂-Äquivalente anfallen. Dies würde übertragen auf den Oberleitungsbus eine Infrastrukturaufwendung von weiteren 22 g CO₂-Äquivalente je Bus-Kilometer bedeuten. Da die benötigten Ladeleistungen der Elektrobusttechnologien in einer ähnlichen Größenordnung liegen, ist im Vergleich zwischen den Technologien auch von ähnlichen Umweltwirkungen aus der Herstellung der Unterwerke auszugehen.

Wasserstofftankstelle

Für die Emissionen aus dem Betrieb und der Herstellung der Wasserstofftankstelle wird auf Daten von LBST auf Basis unveröffentlicher Projektarbeiten zurückgegriffen.

Tabelle 33: Emissionen aus Betrieb und Herstellung Wasserstofftankstelle je kWh abgegebener Menge CGH₂ [LBST, 2015, auf Basis unveröffentlichter Projektarbeiten]

CO _{2äq} [g/kWh]	NO _x [mg/kWh]	PM ₁₀ [mg/kWh]
16,3	38	62

Für die Berechnung der Emissionen je Bus-km ist der Verbrauch der Brennstoffzellenhybridbusse von 2015 (4,5 kWh/km) angenommen.

Dieseltankstelle

Die Emissionen der Dieseltankstelle werden aus ecoinvent 3.1 („infrastructure construction, for regional distribution of oil product, RER“) übernommen und ebenfalls anhand des Dieserverbrauches eines Busses 2015 (5,2 kWh/km) auf einen Buskilometer bezogen.

Tabelle 34: Emissionen Herstellung Dieseltankstelle je kWh abgegebener Menge Diesel [ecoinvent 3.1]

CO _{2äq} [g/kWh]	NO _x [mg/kWh]	PM10 [mg/kWh]
0,04	0,12	0,05

Materialtabellen - Infrastruktur

Tabelle 35: Sachbilanz der Oberleitungsinfrastruktur pro km [Ebrahimi, 2014]

aluminium wrought alloy	942 kg
section bar extrusion, aluminium	890 kg
sheet rolling, aluminium	51,7 kg
concrete	42,5 m ³
copper	7.664 kg
wire drawing, copper	7.664 kg
Strom	2.954 MJ
flat glass uncoated	73,7 kg
tempering, flat glass	73,7 kg
lead	7,2 kg
antimony	1,5 kg
magnesium	8,8 kg
PEX (polyethylen high density granulate)	428 kg
silver	4,3 kg
steel, low alloyed	249 kg
wire drawing, steel	249 kg
steel, unalloyed	155 kg
sheet rolling, steel	155 kg
reinforcing steel	11.952 kg
zinc coating, pieces	224 m ²
welding, arc, steel	10,0 m

Materialtabellen - Fahrzeuge

Tabelle 36: Herstellung des Elektroantrieb (Leistung 100 kW) [Habermacher, / Althaus, 2011]

aluminium oxide	0,35	kg
aluminium, wrought alloy	27,89	kg
boric oxide, at plant GLO	0,06	kg
Brass	0,98	kg
capacitor, film type, for through-hole mounting	1,37	kg
Copper	10,75	kg
Ferrite	1,58	kg
neodymium oxide	0,62	kg
nylon 6	0,25	kg
pig iron, at plant GLO	1,43	kg
polyester resin, unsaturated	0,63	kg
polystyrene, high impact	0,42	kg
printed wiring board, for through-hole mounting, Pb containing surface	0,22	kg
printed wiring board, for through-hole mounting, Pb free surface	0,22	kg
printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free	1,62	kg
resistor, surface-mounted	0,03	kg
silicone product	0,01	kg
steel, chromium steel 18/8, hot rolled	6,79	kg
steel, low-alloyed, hot rolled	37,19	kg
selective coat, aluminium sheet, nickel pigmented aluminium oxide	8,76E-03	m2
zinc coat, coils	0,02	m2
resistor, auxiliaries and energy use	0,35	kg
sheet rolling, steel	44,04	kg
wire drawing copper	10,78	kg
sheet rolling aluminium	27,53	kg
electricity, low voltage	0,25	kWh
Strom, Mittelspannung	26,52	kWh
heat, district or industrial, natural gas	22,35	MJ
heat, central or small-scale, other than natural gas	664,37	MJ
waste plastic, industrial electronics	0,06	kg

Tabelle 37: Materialien des Wasserstofftanks (6 kg H₂ und 350 bar) [Elgowainy, et al., 2013]

Karbonfaserverstärkter Kunststoff	53	kg
Glasfaserverstärkter Kunststoff	6,1	kg
Polyethylen- Granulat HDPE	11,4	kg
Schaum (Isolierung)	5,2	kg
Stahl, niedriglegiert	10,6	kg
Chromstahl	7,9	kg
Elektronik (Silizium)	1,0	kg

Tabelle 38: Sachbilanzdaten der Abgasnachbehandlung inklusive Auspuff nach [Salman, / Chen, 2013]

ecoinvent 3.1 Produktname	Originalname	Menge
brass	brass	0,060 kg
cast iron	cast iron	0,010 kg
copper	copper	0,082 kg
ceramic tile	cordierite	33,66 kg
lanthanum oxide	lanthanum	0,083 kg
polyethylene high density granulate	polybutylene terephthalate granulate	0,033 kg
	polyethylene high density granulate	0,012 kg
epoxy resin insulator	epoxy resin insulator	0,516 kg
glass fibre	glass fibre	1,847 kg
palladium	palladium	0,004 kg
platinum	platinum	0,014 kg
silicone product	silicone product	3,96 kg
sheet rolling, chromium steel	stainless steel cold rolled coil	53,57 kg
chromium steel		
steel, chromium steel 18/8, hot rolled	stainless steel white hot rolled coil	1,926 kg
sheet rolling, steel	steel cold rolled	27,72 kg
steel, low-alloyed		
	engineering steel	0,024 kg
steel unalloyed	steel wire rod	1,979 kg