



HOCHSCHULE LANDSHUT
HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN



AN-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE NUTZFAHRZEUGFORSCHUNG UND ABGASANALYTIK (**BELICON**)
GESCHÄFTSFÜHRER: PROF. DR.-ING. RALPH PÜTZ

Ökologischer und ökonomischer Vergleich der SWG-Busflotte in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung auf den Zeithorizonten „heute“ und „mittelfristig“

Erstellt im Auftrag von:

**Stadtwerke Gießen AG (SWG)
Lahnstraße 31
35398 Gießen**

Bericht Nr. BELICON/SWG-1-07.05.2018

Dieser Bericht darf nur vollinhaltlich, ohne Weglassen und Hinzufügen, veröffentlicht werden. Sollte er auszugsweise abgedruckt oder vervielfältigt werden, so ist vorher die schriftliche Genehmigung des Verfassers einzuholen.

Freigegeben:	Prof. Dr. Ralph Pütz	07.05.2018	<i>R. Pütz</i>
Erstellt:	Prof. Dr. Ralph Pütz und Mitarbeiter		

Inhalt

Inhaltsverzeichnis	3
1 Aufgabenstellung.....	4
2 Gewählter Systemansatz für die ökologische und ökonomische Analyse	7
3 Untersuchte konventionelle und alternative Antriebe	9
4 Ökologischer Vergleich von konventionellen und alternativen Antrieben	21
4.1 Vorkette (WTT; Well-to-Tank)	22
4.1.1 Dieselmotorkraftstoff	22
4.1.2 Erdgas und Biogas.....	23
4.1.3 Wasserstoff	25
4.1.4 Elektrische Energie/Strom.....	27
4.2 Fahrzeugproduktion	27
4.3 Fahrbetrieb (TTW; Tank-to-Wheel)	29
4.4 Ergebnisse der Ökologie-Bilanzen	30
4.4.1 Ökologischer Vergleich 2018 ("heute")	30
4.4.2 Ökologischer Vergleich 2030 („mittelfristig“).....	34
5 Ökonomischer Vergleich von konventionellen und alternativen Antrieben	36
5.1 Fahrzeuginvestkosten und Ersatzinvestitionen	36
5.2 Kraftstoff- bzw. Energiekosten	40
5.3 Instandhaltungskosten	41
5.4 Infrastruktur-Investkosten.....	42
5.5 Ergebnisse der Ökonomie-Bilanzen.....	48
5.5.1 Ökonomischer Vergleich 2018 ("heute").....	48
5.5.2 Ökonomischer Vergleich 2030 ("mittelfristig").....	53
6 Schlussfolgerungen zum Vergleich konventioneller und alternativer Antriebe für die Technologieausrichtung der SWG ..	58
7 Literaturverzeichnis	60

1 Aufgabenstellung

In der Universitätsstadt Gießen wird an einigen Immissionsmessstellen der Jahresmittel-Grenzwert für Stickstoffdioxid (NO₂) von 40 µg/m³ überschritten, so dass ein Masterplan für die Gestaltung nachhaltiger und emissionsfreier Mobilität vorbereitet wird, da der motorisierte Verkehr zu rund 70 % der NO_x-Belastung beiträgt. Der Masterplan soll explizit die Zeithorizonte „kurzfristig“ und „mittelfristig“ berücksichtigen und auch die Auswirkungen des Einsatzes alternativer Antriebe und Kraftstoffe in der Busflotte der Stadtwerke Gießen (SWG) analysieren.

Der politisch propagierte Paradigmenwechsel hin zu einer Elektromobilität im Straßenverkehr umfasst alle Bereiche vom Pkw über leichte bis hin zu schweren Nutzfahrzeugen. Zu den Letzteren zählen auch Linienbusse, die im Stadtverkehr aufgrund fest vorgegebener, reproduzierbarer Linien das Potenzial eines reduzierten Aufwands für die erforderliche Energiezuführungs-Infrastruktur aufweisen und somit für die Einführung der Elektromobilität prädestiniert scheinen. Die Entwicklung von Elektrobussen – mit der Ausnahme des (partiell) oberleitungsgebundenen Trolley-(Hybrid-) Busses – steht jedoch noch am Anfang. Andererseits haben etablierte, konventionelle Antriebe für Linienbusse – Diesel- und Erdgasantriebe – bereits einen derart hohen Reifegrad erreicht, der bei allen Herstellern ein Nahe-Null-Emissionsniveau bei vertretbarer Wirtschaftlichkeit ermöglicht. Dies belegen umfangreiche Messreihen des Instituts BELICON, die belastbar aussagen, dass die Emissionsreduzierung der Euro-VI-Fahrzeuge einem „Quantensprung“ im Vergleich zur Vorgängerstufe Euro V/EEV entspricht. Dies wurde auch in der Studie **„On-Road-Emissionsvermessung (PEMS) von Euro-VI-Gelenkombussen in Gießen: Vergleich der Realemissionen eines CNG- und eines Diesel-Gelenkbusses des Herstellers MAN im Linienbetrieb auf den repräsentativen Gießener Stadtbuslinien 801 und 1“** (Bericht Nr. BELICON/SWG-1-21.08.2016) aufgezeigt.

Generell weisen einige Vertreter der Euro-VI-Population bei den emittierten kritischen Komponenten Partikel (PM, Particulate Matter; PN, Particulate Number) und Stickoxide (NO_x; NO und NO₂) je nach Umgebungsbedingungen sogar eine geringere Konzentration auf als in der angesaugten Umgebungsluft. Folglich besteht hinsichtlich der Partikelimmissionen – und hier insbesondere des als kanzerogen bewerteten

Feinstaub (PM10) – sowie hinsichtlich der Stickoxidimmissionen – und hier insbesondere bezüglich des Reizgases NO₂ – für Linienbusse mit Verbrennungsmotor ab der Grenzwertstufe Euro VI bereits kein akuter Handlungsbedarf mehr.

Nach der Androhung der EU von Sanktionen gegen die deutsche Bundesregierung aufgrund signifikanter Überschreitungen der Luftqualitätsgrenzwerte in einigen Kommunen und Ballungsräumen und den erfolgreichen Klagen von Umweltverbänden gegen einzelne Kommunen kann für die Verkehrsunternehmen nach dem Urteil des Bundesverwaltungsgerichts vom 27.02.2018 dort Handlungsbedarf vor Ort entstehen, wo die Immissionen an Stickoxiden (gemessen wird das Reizgas NO₂) überschritten werden. Im Fokus stehen aktuell – forciert durch die vermeintliche „Dieselkrise“ aufgrund Betrugsvorwürfen gegen die Pkw-Industrie – insbesondere die Stickoxidemissionen (NO_x) aus Dieselmotoren. Straßenfahrzeuge machen im Mittel etwa 40 % der Stickoxidemissionen aus – in Gießen rund 70 %. Somit bestehen aktuell ernsthafte Bestrebungen der Bunderegierung – insbesondere motiviert durch die Androhung von Klagen der EU und DUH wegen der Überschreitung der Luftqualitätsgrenzwerte in einigen Kommunen –, die Plakettenzuordnung mit Bezug auf Stickoxidemissionen zu ergänzen („blaue Plakette“), was weiteren Handlungsbedarf – auch in Bezug auf eine potenzielle Forderung von Nachrüstung mit SCR-Systemen bei älteren Dieselfahrzeugen – hervorrufen könnte. Vorbeugend hatte der Bund auf dem zweiten Kommunalgipfel am 28. November 2017 mit dem „Sofortprogramm Saubere Luft 2017-2020“ ein Maßnahmenpaket für bessere Luft in Städten aufgelegt. Für das Sofortprogramm steht ab sofort 1 Milliarde Euro bereit. Gegenstand des Programms sind einerseits Maßnahmen für die Elektrifizierung des urbanen Verkehrs und die Errichtung von Ladeinfrastruktur und für die Digitalisierung von Verkehrssystemen, andererseits zur Nachrüstung von Diesel-Bussen im ÖPNV mit wirkungsvollen (SCRT-) Abgasnachbehandlungssystemen. Alle Maßnahmen sollen schon bis 2020 – also kurzfristig – Wirkung entfalten. Das Sofortprogramm soll soweit möglich auf Grundlage der bestehenden Förderrichtlinien des Bundes umgesetzt werden, wobei bestehende Förderprogramme finanziell aufgestockt werden. Alleine für die Nachrüstung von Linienbussen wurden 107 Mio. € bereitgestellt.

Insofern herrscht in vielen Verkehrsunternehmen aktuell Verunsicherung, welche Antriebstechnologie kurz- und mittelfristig für die Fahrzeugneubeschaffung aus ökologisch-ökonomischen Erwägungen das Optimum bietet und welche Maßnahmen zur Emissionsverbesserung bestehender Fahrzeugflotten zur Verfügung stehen. Dieses Spannungsfeld beschreibt auch Abbildung 1-1. Deshalb soll im Rahmen dieser Studie auf der Basis der Randbedingungen der Stadtwerke Gießen/MIT.BUS ein Vergleich der etablierten und alternativen Antriebstechnologien für Linienbusse bezogen auf die konkrete Flottenzusammensetzung erfolgen und auch ein Ausblick auf die weitere, mittelfristige Entwicklung gewagt werden. So soll in dieser Studie die Analyse der konventionellen Linienbusantriebe im Vergleich zu den Alternativen des Spektrums Elektromobilität insbesondere für die Bedingungen der SWG und deren durchschnittliche Liniencharakteristik auf den Betrachtungshorizonten 2018 („heute“) und 2030 („mittelfristig“) für eine von der SWG dokumentierte, charakteristische mittlere Zyklusgeschwindigkeit von ca. 16,7 km/h und eine mittlere Jahresfahrleistung von 46.000 km angesetzt werden. Die SWG/MIT.BUS betreibt in der Summe 56 Busse, davon 23 Solo- und 33 Gelenk-Busse. Weitere Verbesserungen durch einen kompletten Umstieg auf eine CNG-Busflotte mit Biogas im Vergleich zu den Optionen der Elektromobilität sollen quantifiziert werden.

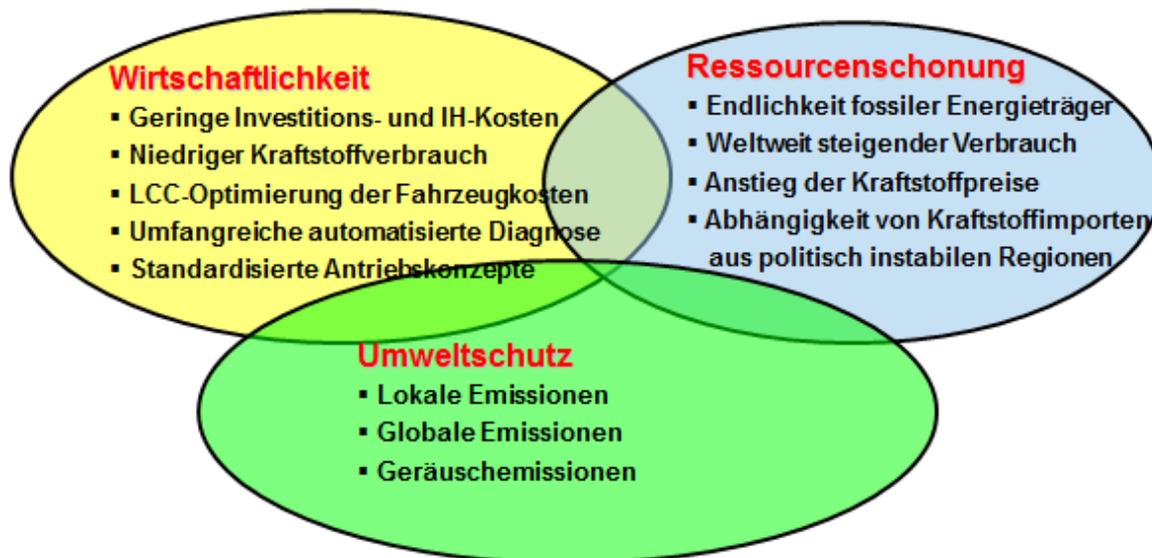


Abb. 1-1: Treiber für die Weiterentwicklung von Antriebssystemen bei Linienbussen

Die ökologischen und ökonomischen Vergleiche sollen sich somit auf folgende sechs Szenarien (Flottenzusammensetzungen) beziehen:

- **aktuelle SWG-Flotte 2018.**
- **SWG-Flotte nach Ersatz aller Diesel- durch Erdgasbusse**, differenziert nach den Optionen „Erdgas“ und „Biogas“.
- **SWG-Flotte besteht ausschließlich aus Elektrobussen**, differenziert nach den Optionen
 - „Opportunity Charger“ (Gelegenheitslader),
 - „Overnight Charger“ (Nachtlader) und
 - Brennstoffzellen-Hybrid.

Es sei an dieser Stelle betont, dass in der Regel die **Elektromobilität für jedes Verkehrsunternehmen und seine Randbedingungen ein individuelles System** darstellt, bei dem Fahrzeug- und Antriebstechnik, Batterietyp, Energiezuführungsart/Ladetechnik und Betriebsmuster auf die jeweilige Linientopologie exakt abgestimmt sein müssen. Die zugehörigen Analysen für geeignete Positionen der Ladeinfrastruktur im Bediengebiet der SWG und eventuelle weitere Erfordernisse aufgrund z.B. lokal nicht vorhandener Mittelspannungsnetze sind nicht Gegenstand dieser Studie, so dass in dieser Studie Mehraufwendungen für die Infrastruktur lediglich pauschal dargestellt werden können.

2 Gewählter Systemansatz für die ökologische und ökonomische Analyse

Für eine umfassende ökologische und ökonomische Bewertung von Fahrzeugflotten müssen alle Stationen des Lebenszyklus von Linienbusverkehrssystemen wie

- Fahrzeugproduktion (und ggf. -entsorgung),
- Kraftstoffbereitstellung (Well-to-Tank; WTT),
- Fahrbetrieb (Tank-to-Wheel; TTW) und
- Instandhaltung

in die Analyse einbezogen werden, da die **isolierte Betrachtung nur des eigentlichen Fahrbetriebs zu völlig falschen Schlüssen führen** kann, da in allen o.g. Subsystemen Energie verbraucht wird und Emissionen entstehen. Erst auf diese Weise können im engen Kontext einer „ganzheitlichen“ ökologischen Integrität zielführende Lösungsansätze für Linienbusverkehrssysteme mit sowohl geringen lokalen als auch globalen Emissionen bei hoher Energieeffizienz und reduzierten Geräuschen systembezogen identifiziert werden. So kann z.B. eine „Nullemission“ der Elektromobilität im

Einsatz vor Ort durch ggf. höhere Emissionen in der Kraftstoffbereitstellung und Fahrzeugproduktion zu signifikanten ökologischen Nachteilen führen.

Im Hinblick auf eine klare Differenzierung der Lebenszyklusphasen bietet sich für das System „Linienbus“ eine Anordnung der Subsysteme nach R. Pütz wie folgt an:

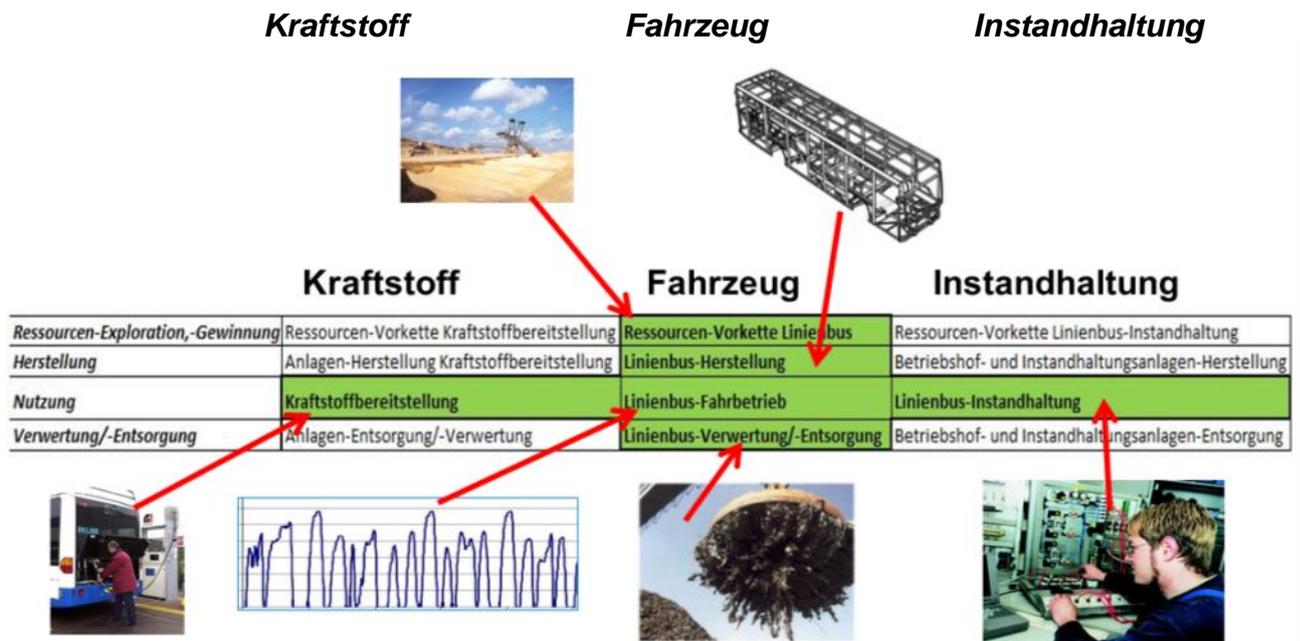


Abb. 2-1: Allgemeines Modell für das ökologische System „Linienbus“ mit Subsystemen in Lebenszyklusbetrachtung nach R. Pütz, Diss.

<i>Beschaffung</i>	Linienbus-Kapitaldienst		
<i>Nutzung</i>	Kraftstoff- und Reagenskosten	Personalkosten Fahrbetrieb, Sonstige Personalkosten, Sonstige Kosten, Externe Kosten	Linienbus-Instandhaltung
<i>Rücknahme</i>	Linienbus-Restwert		

Abb. 2-2: Allgemeines Modell für das ökonomische System „Linienbus“ mit Subsystemen in Lebenszyklusbetrachtung nach R. Pütz, Diss.

Die grün hervorgehobenen Subsysteme bilden das System „Linienbus“, das eine umfassende ökologische und ökonomische Analyse erlaubt.

Bei der Analyse der Emissionen stehen als **lokal** wirksame Hauptkriterien die Partikel- und Stickoxid-Emissionen und als **global** wirksame Hauptkriterien die CO₂-Emissionen bzw. das CO₂-Äquivalent im Vordergrund, deren Wirkungen über die Bestimmung der externen Kosten als **ökologisches Profil** einer Antriebstechnik zusammengefasst werden können.

Bei der ökonomischen Analyse erfolgt die Fokussierung auf die „Fahrzeugkosten“, die aus Kapitaldienst, Kraftstoff/Energiekosten und Instandhaltungskosten gebildet werden, ergänzt durch die Kosten für die Energiezuführungsinfrastruktur.

3 Untersuchte konventionelle und alternative Antriebe

Als „konventionell“ können Linienbusse mit den etablierten Diesel- und Erdgasantrieben bezeichnet werden. Dabei ist eine „Mild-Hybridisierung“ beim Dieselantrieb durch Einsatz von sogenannten Rekuperationsmodulen bereits heute als Serienstandard verfügbar (EvoBus stellte ein solches Fahrzeug mit 48-V-Bordnetz auf der Busmesse 2017 in Kortrijk vor, MAN im Frühjahr 2018). Linienbusse mit konventionellem, verbrennungsmotorischem Antrieb machen heute immer noch rund 98% der deutschen Linienbusflotte aus (vgl. Abbildung 3-1).

Antriebstechnologie	Prozent
Diesel konventionell	94,85
Diesel-Hybrid	1,65
Erdgas (CNG)	2,91
Wasserstoff-Verbrennungsmotor (H2 ICE)	0,00
Brennstoffzellen (BZ)-Hybrid	0,04
Batterie	0,21
Trolley	0,29
Trolley-Hybrid	0,04
Summe	100,00

Abbildung 3-1: Antriebstechnologien in der deutschen Linienbusflotte 2017 (Stadt- und Überlandbusse) (Quelle: VDV)

Trotz zahlreicher Pilotprojekte und Praxiserprobungen von Verkehrsunternehmen mit alternativen Antrieben, die in der Regel national von den Ministerien BMVI, BMU und BMWI sowie international durch EU-Förderprojekte (z.B. ZeEUS, Zero Emission Electric Urban Bus System und ELIPTIC, Electrification of Public Transport in Cities) finanziert und medienwirksam präsentiert werden, ist der prozentuelle Anteil an alternativen Antrieben in der deutschen Linienbusflotte noch vernachlässigbar gering. In

der Summe erreichen Linienbusse mit Batterien und Brennstoffzellenantrieb heute einen Anteil von nur 0,25 Prozent der VDV-Linienbusflotte, obwohl umfangreiche Marketingmaßnahmen einen anderen Anschein erwecken mögen. Mittelfristig wird weiterhin die Li-Ionentechnik der 2. und 3. Generation eingesetzt werden. Erst die Post-Li-Ionen-Technologie, deren Einführung nach 2030/2035 erwartet wird, dürfte zu signifikanten Effizienzsteigerungen führen. Heute ist der forcierte Einsatz von Batterie- und Brennstoffzellenbussen lediglich von jenen Verkehrsunternehmen verantwortbar durchführbar, die auf eine umfangreiche öffentliche Förderung zurückgreifen können und zudem eine „kritische Größe“ der Fahrzeugpopulation überschreiten, da der reguläre Betrieb trotz der Erprobung alternativer Antriebe mit i.d.R. signifikant geringerer Verfügbarkeit aufrechterhalten werden muss.

Auch die zwischenzeitlich als betrieblich serienreif zu bezeichnenden Busse der Brückentechnologie (Full-)Hybrid, die seit längerem im Einsatz sind und bei den alternativen Antrieben dominieren, machen heute lediglich rund 1,65 Prozent der Linienbusflotte aus.

Fast alle renommierten Fahrzeughersteller bieten heute nicht nur Dieselse, sondern auch Erdgasbusse in Serie an. Oftmals sind CNG-Solo- und Gelenkbusse sowie dreiachsige Großraum-Solobusse sowohl in Stadt- als auch Überlandausführung erhältlich. Folgende namhafte Hersteller (in alphabetischer Reihenfolge) bieten Erdgasbusse auf dem deutschen Markt an:

Hersteller	Standard-Solobus	Gelenkbus	Großraumbus	Doppel-Gelenkbus
Iveco	Urbanway CNG	Urbanway G CNG	-	-
MAN	Lion's City CNG	Lion's City G CNG	Lion's City L CNG	-
Mercedes-Benz	Citaro NGT	Citaro G NGT	-	-
Scania	Citywide CNG	Citywide CNG	Citywide LE CNG	-
Solaris	Urbino 12 CNG	Urbino 18 CNG	Urbino 15 CNG	-
Van Hool	-	Exqui. City 18 CNG (Hybrid)	-	Exqui. City 24 CNG (Hybrid)

Abbildung 3-2: Auf dem deutschen Markt verfügbare CNG-Erdgasbusse

Ebenso sind Diesel-(Full-)Hybride in paralleler, serieller und leistungsverzweigender Ausführung zwischenzeitlich bei fast allen namhaften Hersteller im Angebot (nachfolgend in alphabetischer Reihenfolge):

Hersteller	Standard-Solobus	Gelenkbus	Großraumbus	Doppel-Gelenkbus
Heuliez	GX 337 Hyb	GX 437 HYB	-	-
Iveco	Urbanway Hybrid	Urbanway G Hybrid / Crealis 18m Hybrid	-	-
King Long	E12	-	-	-
MAN	Lion's City Hybrid	-	-	-
Mercedes-Benz	Citaro Hybrid	-	-	-
Scania	Citywide LE Hybrid	-	Citywide LE Hybrid	-
Solaris	Urbino 12 Hybrid	-	-	-
Van Hool	A330 / A360 / A300 Hybrid	AG300 Hybrid / Equi. City 18 Hybrid	-	Equi. City 24 Hybrid
VDL	Citea SLF-120 Hybrid	-	-	-
Volvo	7900 H /7900 EH	7900 LAH	-	-

Abbildung 3-3: Auf dem deutschen Markt verfügbare Diesel-Full-Hybridbusse

Der Markt für Elektrobuse ist in rasanter Entwicklung, jedoch treten hier zurzeit nur wenige der großen Hersteller auf. Somit wird die für 2019 angekündigte Elektrobusergeneration bei EvoBus-Mercedes Benz und die 2020 serienmäßig bei MAN erhältliche Elektrobusergeneration mit konzerneigenen VW-Batterien mit großer Spannung erwartet. Folgende Hersteller (in alphabetischer Reihenfolge) bieten heute schon Elektrobuse in Serie an:

Hersteller	Standard-Solobus	Gelenkbus	Doppel-Gelenkbus
Alstom	Aptis	-	-
BYD	Ebus 12	-	-
Ebusco	Citybus 2.1	-	-
Ebus Europa ebe	Blue City Bus	-	-
Higer/Chariot Motors	Electric Bus	-	-
Heuliez	GX 337 Linium Elec	GX 437 Linium Elec	-
Irizar	i2e	ie Tram 18	-
Optare	Metrocity MC, Versa V EV	-	-
Safra	Businnova	-	-
Scania	Citywide E	-	-
Sileo	S12	S18	S25
Solaris	Urbino 12 electric	Urbino 18 electric	-
SOR	NS12	-	-
Van Hool	A330 / A300 L FC	-	Equi. City 24 E
VDL	Citea SLF-120 Electric	Citea SLFA-181 Electric	-
Volvo	7900 Electric	-	-
Yutong	ICE 12	-	-

Abbildung 3-4: Auf dem deutschen Markt verfügbare Elektrobuse

Die Annahme, Elektrobussysteme – außer dem etablierten Trolley-(Hybrid-)System – seien bezüglich Serienreife und Verfügbarkeit mit Diesel- und Erdgasbussen gleichzusetzen, entbehrt aufgrund der aktuellen Praxiserfahrungen (auch der des Autors aus zahlreichen Projekten) zurzeit noch jedes belastbaren Nachweises. Die Abbildungen 3-5 und 3-6 zeigen die aktuelle Verfügbarkeit von Batteriebusssystemen, die je nach Hersteller zwischen 35 und 80 Prozent liegt und darüber hinaus starken monatlichen Schwankungen unterworfen ist.

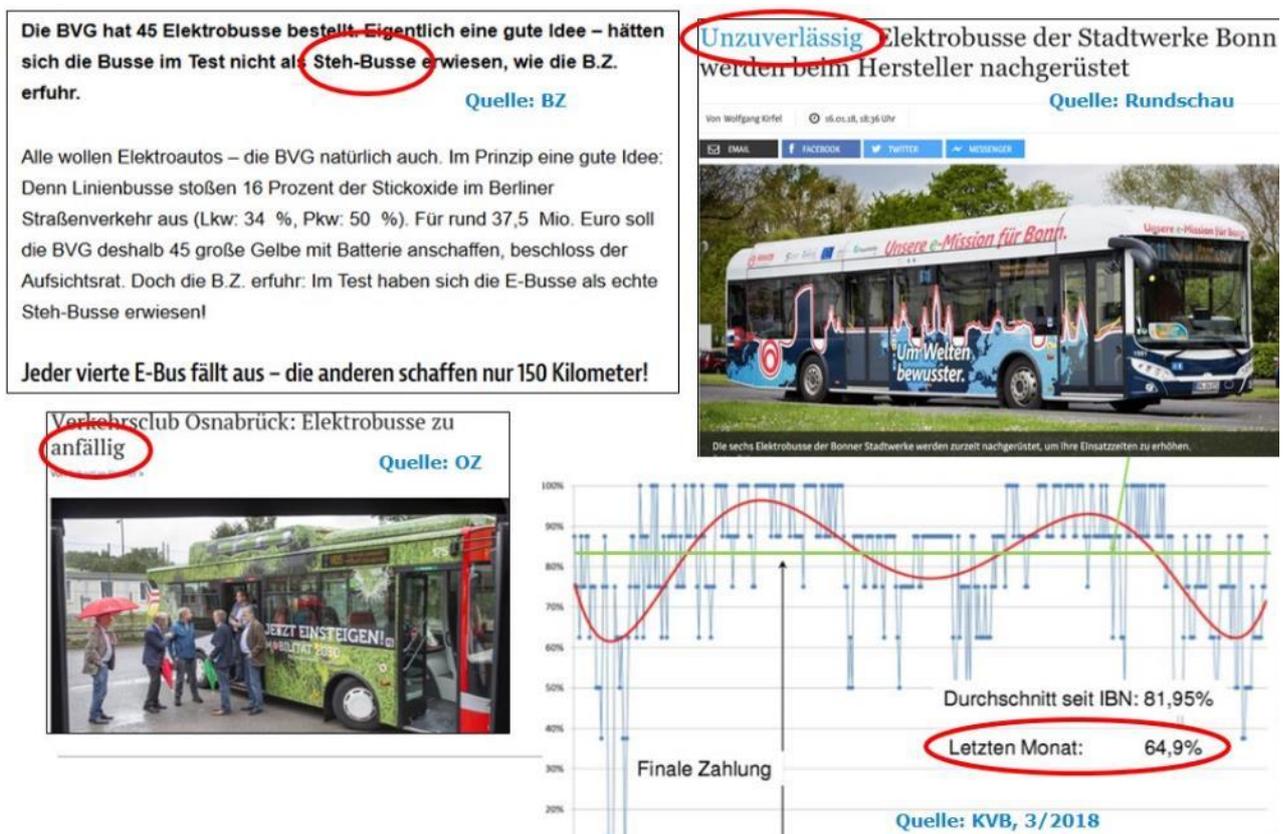


Abbildung 3-5: Aktuelle Berichte zur Verfügbarkeit bzw. Zuverlässigkeit von heutigen Batteriebusssystemen

ZeEUS eBus Performance

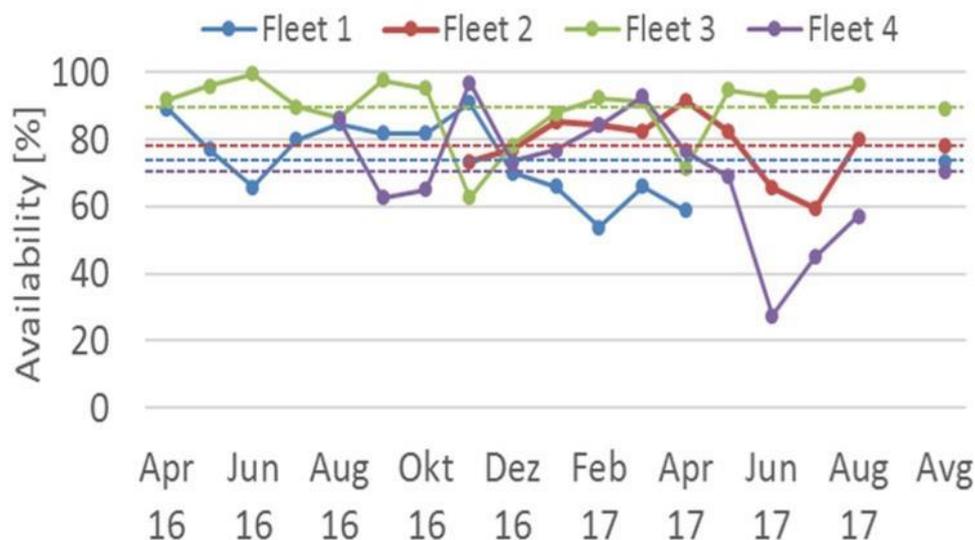


Abbildung 3-6: Verfügbarkeit der Batteriebusssysteme im wegweisenden europäischen Batteriebus-Projekt ZeEUS (Quelle: UITP, U. Guida); Flotte 3 bezieht sich auf Plug-in-Diesel-Hybride

Darüber hinaus treten hier vermehrt Hersteller auf, die – bis auf Solaris – keinen nennenswerten Marktanteil in Deutschland verzeichnen. Diese im deutschen Linienbusbereich neuen Akteure (mit der Ausnahme der auf dem Weltmarkt erfolgreichen Anbieter wie Volvo, Scania und Iveco) hinsichtlich der Präqualifikation mit den etablierten Herstellern EvoBus (Daimler Buses) und MAN gleichzusetzen, die seit Jahren zusammen knapp 90 Prozent der Neuzugänge im deutschen Linienbusbereich verantworten, wäre nach Bewertung des Autors sehr zu hinterfragen. Dies gilt insbesondere für Elektrobusse aus chinesischer Fertigung, die abgesehen vom Stand der Batterieentwicklung hinsichtlich der Fahrzeugqualität nicht mit europäischen Herstellern zu vergleichen sind. Somit wird die für 2018/20 angekündigte Elektrobusgeneration bei EvoBus und MAN hier eine aktualisierte Bewertung erfordern. Der Weltverband der Verkehrsunternehmen UITP äußert sich zur weiteren Entwicklung der Elektromobilität vorsichtig (siehe Abbildung 3-7), während die Hamburger Hochbahn als einer der Vorreiter der Elektromobilität in Deutschland in 2016 gar ein ernüchterndes Urteil fällte (siehe Abb. 3-8), aber zwischenzeitlich – ein Jahr später – für den Verkehrsverbund Hamburg die Beschaffung von 60 Batterie-Solobussen für 2019/2020 angekündigt hat. Auch die

BVG Berlin hat die Beschaffung von zunächst 30 Eindeckomnibussen und 15 Gelenkbussen mit Elektroantrieb sowie der entsprechenden Ladeinfrastruktur trotz der enttäuschenden Ergebnisse ihres Pilotprojekts angekündigt.



Abbildung 3-7: Batteriebus-Konfigurationen: Bewertung durch den Weltverband der Verkehrsunternehmen UITP (Quelle: UITP, 2017)

Einsatz von Elektrobussen bei der HOCHBAHN

- Grundsätzlich 3 Konzepte für Elektrobusse relevant
 - Batteriebusse mit kleinen Energiespeichern und dezentraler Ladeinfrastruktur an Endhaltestellen
 - Batteriebusse mit größeren Energiespeichern und Laden nur auf dem Betriebshof
 - Brennstoffzellenbusse bzw. Hybridbusse mit Brennstoffzellen zur Verbesserung der Reichweite
- Antriebe funktionell differenziert einsetzen

Batteriebusse	Brennstoffzellenbusse
<ul style="list-style-type: none"> Kürzere Linien ohne Linienwechsel im Umlauf Laden auf Betriebshof statt dezentral auf Linien Solowagen statt Gelenkbusse Geringere Flexibilität und Produktivität 	<ul style="list-style-type: none"> Längere Linien mit Linienwechsel im Umlauf Flexibilität und Produktivität wie Dieseldibus Gelenkbusse, elektrische Nebenverbraucher Technisch komplexere Systeme
- Bei Betriebsüberwachung bisher überwiegend Fahrplan, Mitarbeiter und Fahrzeuge im Fokus – Künftig komplexe Systeme einschließlich Infrastruktur, Ladezustand Batterien etc.!
- Fahrpersonal und Betriebslenkung haben großen Einfluss auf den Umsetzungserfolg - Viele neue und zusätzliche Anforderungen!
- Bislang bietet noch kein Hersteller Busse an, die für regelmäßige und dauerhafte Einsätze tauglich sind (Reichweite, Verfügbarkeit)!

Abbildung 3-8: Bewertung des Entwicklungsstandes der Elektromobilität durch die Hamburger Hochbahn, den Pionier der Batterie- und Brennstoffzellenbus-Erprobung in Deutschland (Quelle: HHA, U. Riedel, 2016)

Der Autor sieht die optimistische Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen bei Neufahrzeugen im Stadtbusbereich unter für die Elektromobilität günstigsten Annahmen

wie in Abbildung 3-9 dargestellt. Dabei wird ein Technologiefortschritt bei Batterien mit Migration auf die Post-Li-Ionen-Technik schon vor 2030 und damit optimistischer als in den Abbildungen 3-10 und 3-11 unterstellt. Nach Bewertungen in der Batterie Roadmap und seitens der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) ist jedoch mittelfristig kaum eine Verbesserung der Batterietechnik zu erwarten, so dass mittelfristig weiterhin die Li-Ionentechnik der 2. und 3. Generation eingesetzt werden wird (vgl. Abb. 3-11). Erst die Post-Li-Ionen-Technologie – ob Li-S, Li-Luft oder Festkörperbatterien, deren Einführung erst langfristig erwartet wird – würde zu Effizienzsteigerungen führen.

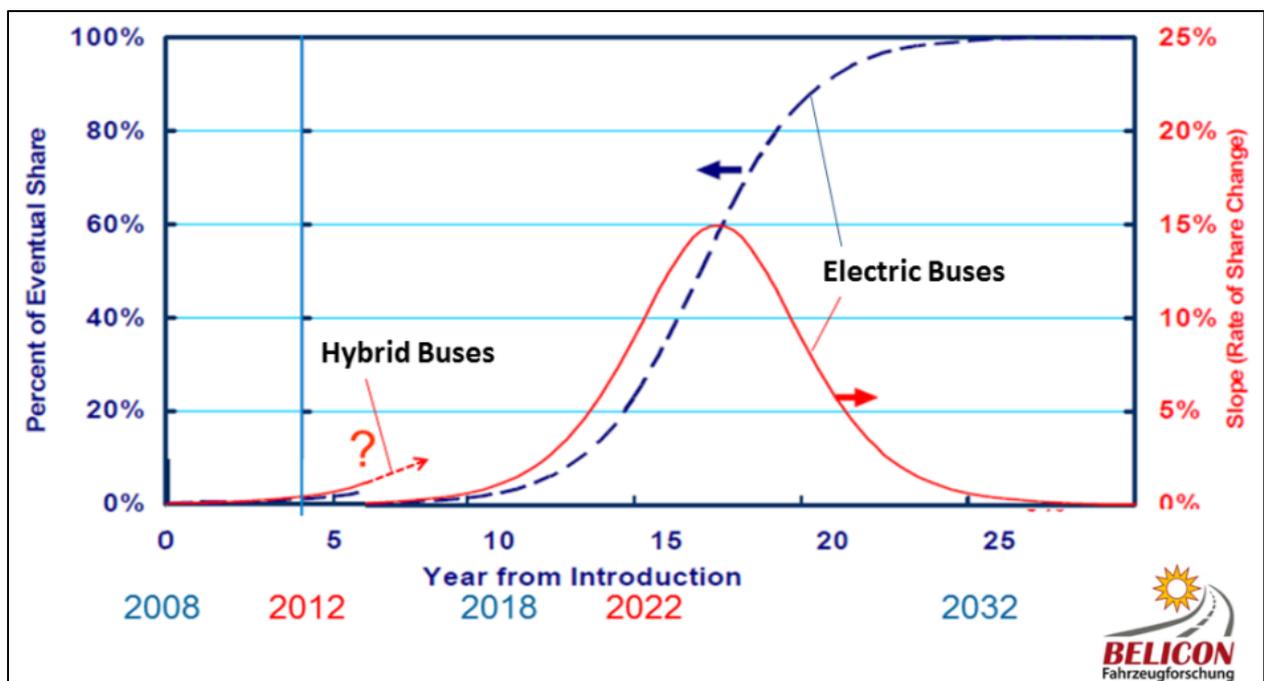


Abbildung 3-9: Potenzielle Marktdurchdringung von Elektrobussen: Entwicklung der Neuzugänge im Stadtbereich unter optimistischen Annahmen (Quelle: © BELICON)

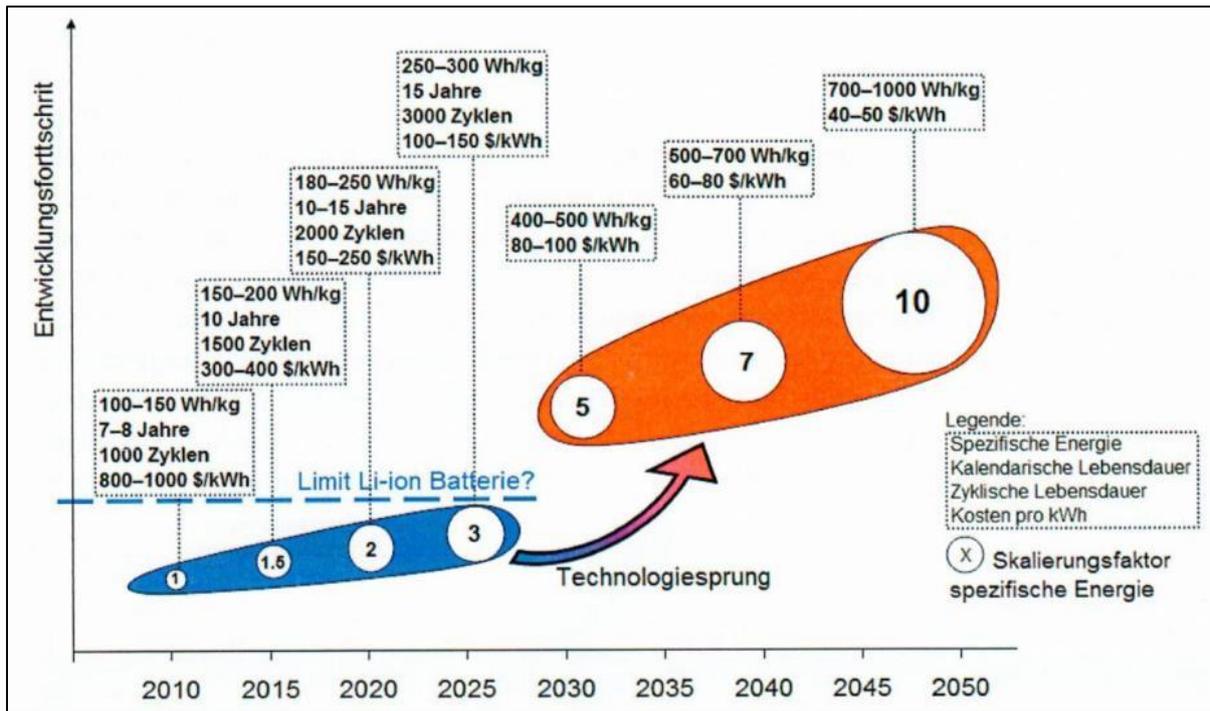
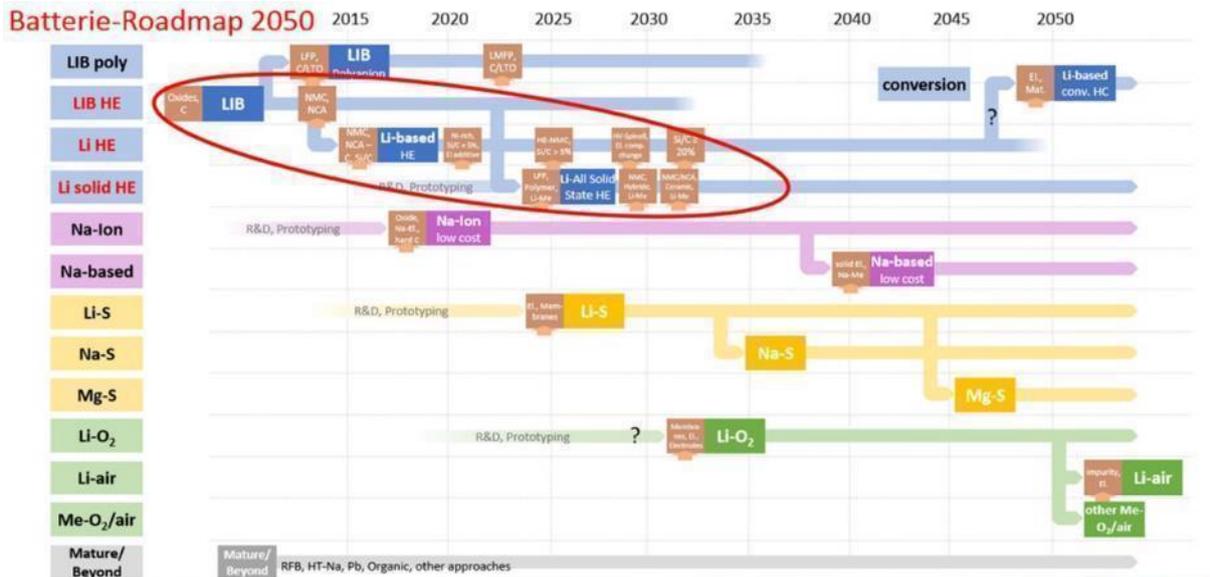


Abbildung 3-10: Aggregierte Technologie-Roadmap für Traktionsbatterien/mobile Anwendungen (Quelle: Schulz, A., Diss. 2015)



Fazit: „Quantensprung“ erst nach 2035?



Abbildung 3-11: Batterietechnologien für Fahrzeuganwendungen im Zeitverlauf (Quelle: Batterie Roadmap 2050)

Zunächst kann hier konstatiert werden, dass der zu konventionellen Antrieben äquivalente Einsatz alternativer Antriebstechnologien im deutschen ÖPNV, insbesondere von Batterie- und Brennstoffzellenbussen, heute folglich noch sehr begrenzt ist. Mit der Annäherung an eine betriebliche Serienreife dieser Technologien wird deren Einsatz zukünftig weiter forciert werden. Kleinere und mittlere Verkehrsunternehmen unterhalb einer Flottengröße von 200 Bussen dürften von einem breiten Einsatz alternativer Antriebe mit heute noch i.d.R. signifikant reduzierten Verfügbarkeiten des Gesamtsystems (inklusive der Energiezuführungs-Infrastruktur) völlig überfordert sein, da mit Ausnahmen der Unternehmen mit Straßenbahnen auch die Personal-Qualifikationsstruktur hier unzureichend ist. In den kleineren und mittleren Unternehmen beschränkt sich der Einsatz alternativer Antriebe aktuell sinnvollerweise allenfalls auf Einzelfahrzeuge, um Erfahrungen mit der Elektromobilität zu sammeln. I.d.R. muss auch erst eine Strategie für die mittel- bis langfristige Qualifizierung des Instandhaltungspersonals, das mit Ausnahme der großen Straßenbahnbetriebe völlig unvorbereitet für die Elektromobilität ist, gewählt werden.

In dieser Studie soll eine Analyse der etablierten, konventionellen Linienbusantriebe im Vergleich zu den Alternativen des Spektrums Elektromobilität auf den **Betrachtungshorizonten „heute“ (2018) und „mittelfristig“ (2030)** am Beispiel der SWG-Linienbusflotte erfolgen.

Zu den aktuell diskutierten, aussichtsreichen Konzepten der Elektromobilität zählen:

- **Opportunity-Elektrobus** (auch Opportunity Charger oder Gelegenheitslader, GL); verfügt über eine kleinere Batterie und muss auf der Linie regelmäßig nachgeladen werden. Dies erfordert eine Schnellladung mit hohen Strömen und Spannungen. Ladestationen sind zumindest an den Endhaltestelle der Linien anzusetzen.
- **Overnight-Elektrobus** (auch Nachtlader, NL), verfügt über eine große Batterie und wird daher lediglich über Nacht auf dem Betriebshof langsam und schonender nachgeladen.
- **Brennstoffzellen-Hybridbus**, BZ-Hybrid (konventionelle Brennstoffzellenbusse spielen keine Rolle mehr); aufgrund ggf. reduzierter Brennstoffzellenlebensdauer kann ein Ersatz-Brennstoffzellenstack erforderlich werden.

- **Trolley-Hybridbus** (auch „In-Motion-Charger“ oder Hybrid-Oberleitungsbus, HO); konventionelle Trolleybusse werden zukünftig keine Rolle mehr spielen).

Ein wichtiger umweltrelevanter Vorteil aller Elektrobuskonzepte sind die im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Antrieben reduzierten Geräuschemissionen. Praxismessungen des Instituts BELICON belegen, dass beim Verlassen der Haltestelle Elektrobusse um rund 5 dB(A) reduzierte Schalldruckpegel gegenüber Dieselbussen aufweisen, siehe Abbildung 3-12. Anzumerken ist, dass Erdgasbusse je nach Fahrzeug ein um knapp 2 dB(A) geringeres Schalldruckniveau als Dieselbusse aufweisen. Für eine quantifizierte Beurteilung der Umweltwirkungen aufgrund der Schallemissionen fehlt bislang allerdings eine gesetzliche Grundlage anhand z.B. externer Kosten wie bei Schadstoffemissionen (siehe EU-Beschaffungsrichtlinie 2009/33/EG). Dazu müssten jedoch nicht alleine die Schalldruckpegel, sondern diese auch mit Bezug auf die jeweiligen Frequenzen, begutachtet werden. Deshalb unterbleibt in dieser Studie eine Bewertung der Geräuschemissionen.

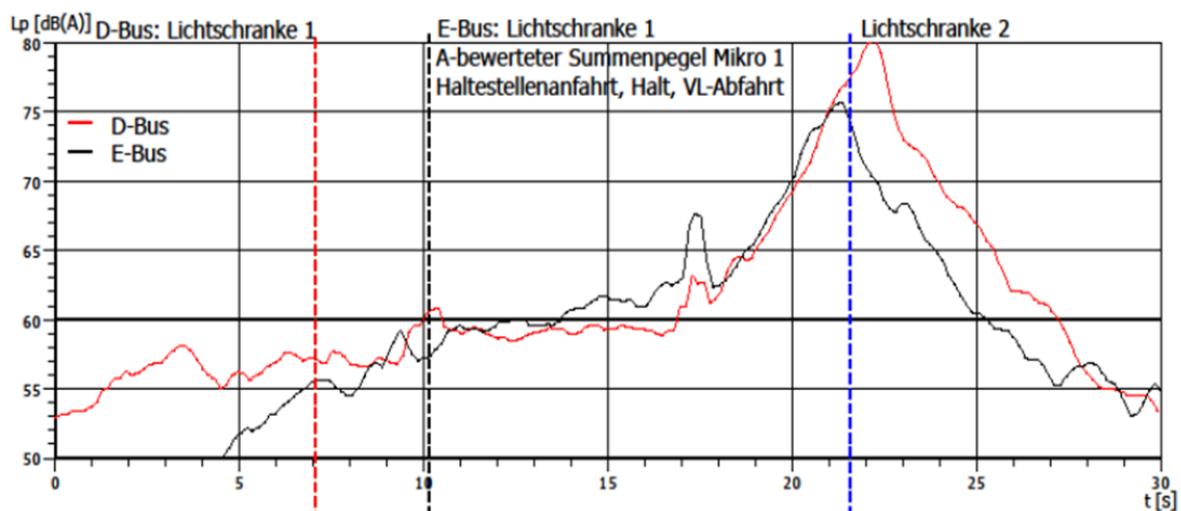


Abbildung 3-12: Beispiel für Außengeräusche von Diesel (D-Bus)- und Batteriebus (E-Bus) bei Haltestellenanfahrt (A-bewerteter Summenpegel) (Quelle: BELICON©)

Neben den ökonomischen Parametern auf der Basis der Fahrzeugkosten (Kapitaldienst, Kraftstoff- und Instandhaltungskosten) sowie Infrastrukturkosten wird die Wirtschaftlichkeit auch durch betriebliche Parameter beeinflusst. So weisen z.B. Overnight-Charger-Batteriebusse, die im Solobus Batteriekapazitäten von über 300 kWh besitzen, aufgrund der großen Batteriegewichte geringere

Fahrgastkapazitäten als konventionelle Busse mit Verbrennungsmotor auf. Dies bedeutet, dass zum Ersatz eines konventionellen Busses in der Morgenspitze zwei Batteriebusse eingesetzt werden müssten, vgl. Abbildung 3-13. Des Weiteren wird im Winter und Sommer, wenn forciert Heizenergie bzw. Energie zum Betrieb der Klimaanlage aus der limitierten Energiekapazität der Batterie geliefert werden muss, die geforderte Tagesfahrstrecke von mehr als 300 km nicht erreicht, so dass aufgrund langer Ladezeiten auch hier zwei Batteriebusse einen konventionellen Bus ersetzen müssen (vgl. Abbildungen 3-14 und 3-15). Die Kombination dieser Einflüsse, z.B. Morgenspitze im Winter, verstärkt die Problematik weiter signifikant.

Die anderen Optionen des Spektrums Elektromobilität weisen derart ausgeprägte Einschränkungen in der Fahrgastkapazität und in den Ladezeiten (Energiezuführung) nicht auf. Beim Opportunity-Charger können sich jedoch bei Ausfall einer der Ladestationen Beeinträchtigungen des gesamten Betriebsablaufs ergeben. Dies gilt auch bei Verspätungen und Zugriff mehrerer Linien auf eine Ladestation.

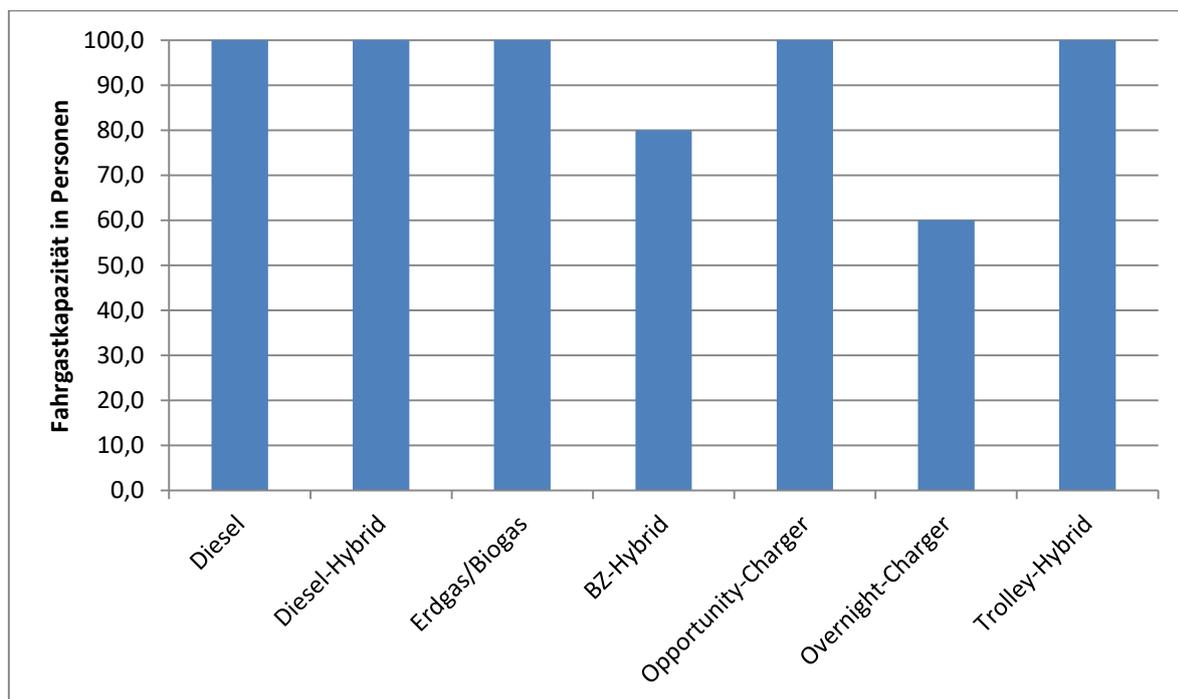


Abb. 3-13: Fahrgastkapazität von Solo-Linienbussen nach Antriebssystem

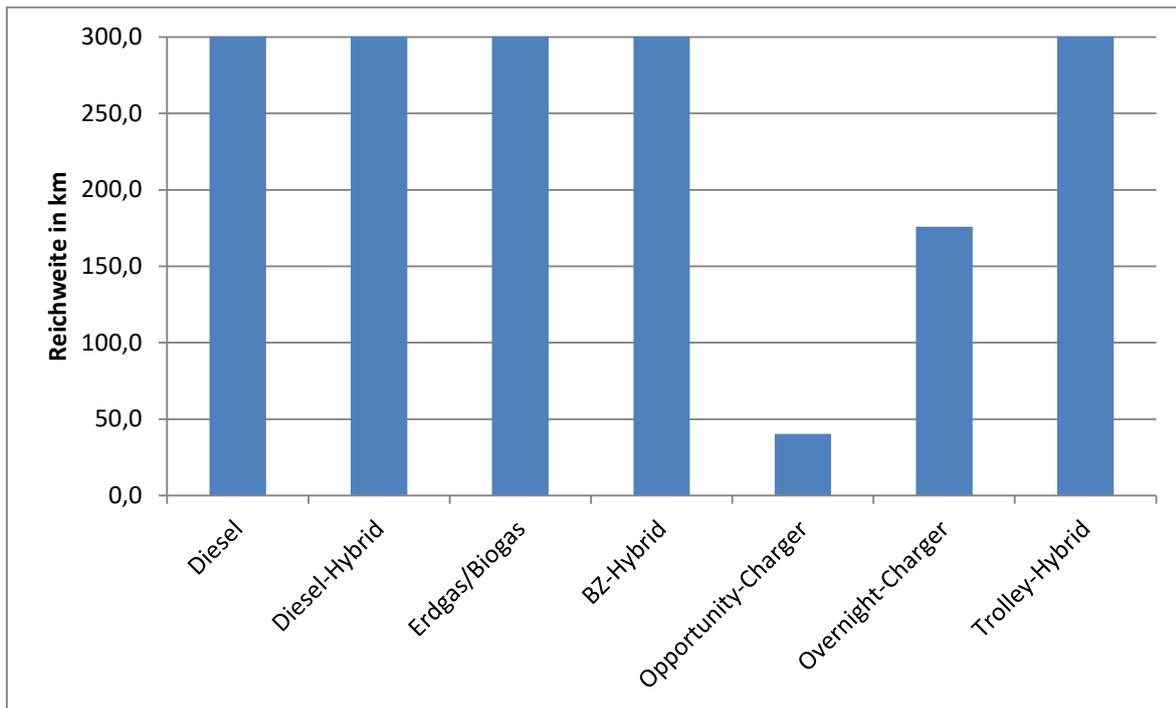


Abb. 3-14: Reichweite von Solo-Linienbussen nach Antriebssystem (gefordert: >300 km pro Tag)

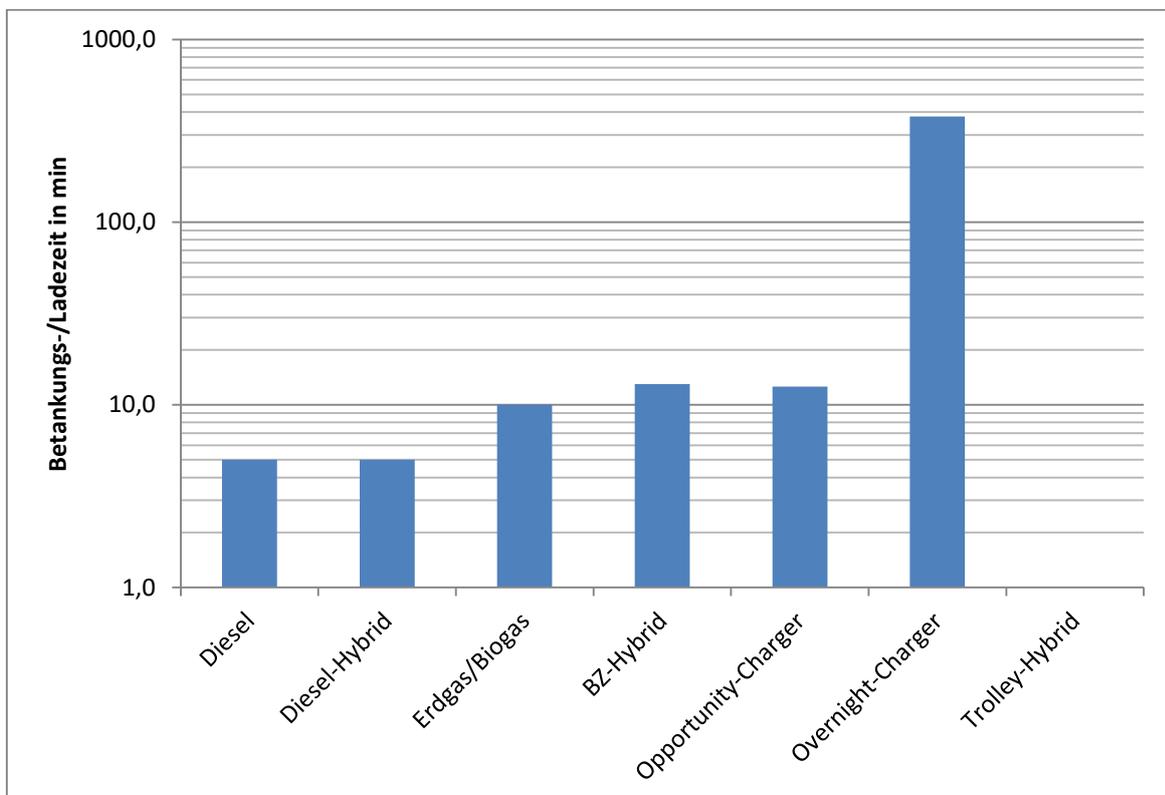


Abb. 3-15: Betankungszeit bei Linienbussen nach Antriebssystemen

4 Ökologischer Vergleich von konventionellen und alternativen Antrieben

Die **ökologische Gesamtbewertung** erfolgt hier gemäß der sogenannten „Beschaffungs“-Richtlinie 2009/33/EG (Richtlinie zur Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge) anhand der Summierung der externen Kosten aus den lokalen und globalen Emissionen aller Subsysteme gemäß Kapitel 2 wie:

- Kraftstoffbereitstellung (WTT; Well-to-Tank),
- Fahrzeugproduktion,
- Fahrbetrieb (TTW; Tank-to-Wheel) und
- Instandhaltung

und charakterisiert somit in der Summe die Umweltrelevanz der untersuchten Antriebsvarianten zum jeweiligen Stand. Wichtige Randbedingungen dieser Umweltbilanz sind dabei die funktionelle Einheit, die Bilanzgrenzen und die berücksichtigten Umweltwirkungen, die nachfolgend detailliert erläutert und insbesondere hinsichtlich des Subsystems Fahrbetrieb auf den speziellen Anwendungsfall der SWG bezogen werden. Als funktionelle Einheit wird ein mit einem **Solobus** erbrachter Kilometer (Fahrzeug-km) im Linienbetrieb definiert. Als Bilanzgrenze für den Vergleich der Umweltwirkungen wird als geographischer Bezugsrahmen Deutschland und als zeitlicher Bezugsrahmen einerseits der aktuelle Stand der Technik (Jahr 2018), andererseits ein Szenario mit im Jahr 2030 neu eingesetzten Bussen betrachtet.

Die Daten für die **Kraftstoff- und Strombereitstellung** (WTT) basieren auf aktuellen Daten und sind mit dem Tool von LBST abgeglichen. Für die **Emissionen im Fahrbetrieb** während der Nutzung (Auspuffemissionen der Diesel- und Erdgasbusse) werden aktuelle PEMS-Messergebnisse im Fahrbetrieb angesetzt, erhoben durch das Institut BELICON in Gießen 2016 und auf eine mittlere Zyklusgeschwindigkeit von 16,7 km/h normiert. Es werden also „echte“ Emissionsdaten verwendet, da die im Handbuch für Emissionsfaktoren (HABEFA Version 3.2) genannten Daten völlig unspezifisch und nach den Erfahrungen des Autors daher auch nur begrenzt geeignet sind. Anzumerken ist, dass die von den SWG genannte mittlere Zyklusgeschwindigkeit von 16,7 km/h

unterhalb des leichten Stadtverkehrs (SORT 2; durchschnittlicher deutscher Stadtverkehr, 18 km/h) liegt und folglich einen für deutsche Verhältnisse recht anspruchsvollen Stadtverkehr repräsentiert.

Daten zur **Herstellung der Fahrzeuge** basieren auf R. Pütz, Diss. 2010 und sind mit neueren Quellen (z.B. LBST-Tool) abgeglichen. Die Energieverbräuche und Emissionen des Bereichs Instandhaltung differieren zwischen den einzelnen Antriebsoptionen nur marginal und werden nachfolgend nicht berücksichtigt.

4.1 Vorkette (WTT; Well-to-Tank)

4.1.1 Dieselkraftstoff

Die Bereitstellung von Dieselkraftstoff erfolgt üblicherweise auf Basis eines Mixes aus konventionellem Rohöl (heute dominierend), 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 basieren auf JEC, 2014. Die Emissionen aus der Bereitstellung von Dieselkraftstoff aus Ölsanden wurden auf Basis von Daten des Öko-Instituts, 2009 berechnet. Für Ölschiefer wurde auf Daten der Förderung und Verarbeitung von Ölschiefer in Estland (in Gavrilova et al., 2010; Kuusik, 2012; Sabanov, Sokman, 2008) zurückgegriffen sowie auf Daten von Brandt, 2009 (Minenbetrieb), Quian, Wang, 2006 (Stromverbrauch Galoter-Prozess) und Öko-Institut, 2011 (Schadstoffemissionen aus Verbrennungsprozessen). Abbildung 4-1 zeigt die Emissionen aus der Bereitstellung von Dieselkraftstoff für unterschiedliche Kraftstoff-Bereitstellungspfade. Die Anteile der für die Bereitstellung von Dieselkraftstoff eingesetzten Rohstoffquellen entstammen Daten der IEA, 2013 und sind in Abbildung 4-2 aufgeführt.

Rohstoffquelle	CO₂-Äquivalente [g/kWh]	Stickoxide [g/kWh]	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

Abbildung 4-1: Emissionen aus der Kraftstoffvorkette für unterschiedliche Bereitstellungspfade

Rohstoffquelle	2018	2030
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%

Abbildung 4-2: Herkunft des Dieselmotorkraftstoffs für Deutschland im Zeitverlauf

Die Emission von globalen und lokalen Emissionen für die Bereitstellung von Dieselmotorkraftstoff für Deutschland auf den Zeithorizonten heute (2018) und mittelfristig (2030) sind in Abbildung 4-3 dokumentiert.

Jahr	CO₂- Äquivalente [g/kWh]	Stickoxide [g/kWh]	Partikel [g/kWh]
Mix 2018	57,8	0,141	0,006
Mix 2030	62,0	0,144	0,008

Abbildung 4-3: Globale und lokale Emissionen für die Bereitstellung von Dieselmotorkraftstoff für Deutschland im Zeitverlauf

4.1.2 Erdgas und Biogas

Die Bereitstellung von Erdgas erfolgt üblicherweise auf Basis eines Mixes aus unterschiedlichen Herkunftsländern. Für die Ermittlung der Vorkettenemissionsfaktoren

wurden Daten von IFEU/Wingas, 2015, Jahresberichte der Erdgas- und Erdölunternehmen, die in Ecoinvent 2.2 (2012) verfügbaren Datensätze sowie Daten von Zukunft Erdgas/DBI, 2016 verwendet. Die Modellierung der Erdgas-Vorkette umfasst hier die Förderung, Aufbereitung und den Transport. Dabei weist die Erdgasbereitstellung aus Russland und Katar die höchsten Treibhausgasemissionen auf, jene aus den Niederlanden, Norwegen, Großbritannien und Deutschland hingegen vergleichsweise geringe. Nachfolgend sind die Emissions-Beiträge der Bereitstellung von Erdgas je nach Herkunftsland in Abbildung 4-4 aufgeführt.

Rohstoffquelle	CO₂- Äquivalente [g/kWh]	Stickoxide [g/kWh]	Staub/Partikel [g/kWh]
Russland	56,7		
Katar	48,9		
Algerien	26,4		
Deutschland	16,0		
Großbritannien	15,5		
Niederlande	3,6		
EU-Mix	28,6	0,162	0,006

Abbildung 4-4: Emissionen aus der Kraftstoffvorkette für unterschiedliche Herkunftsländer; in Deutschland basiert die Erdgasversorgung auf dem üblichen EU-Mix

Die Emission von globalen und lokalen Emissionen für die Bereitstellung von Erdgas für Deutschland auf den Zeithorizonten heute (2018) und mittelfristig (2030) basieren auf dem EU-Mix sowie der Annahme, dass in diesem für 2030 ein Anteil von 10% an Erdgas aus noch größerer Transportentfernung von den Erdgasfeldern (7.000 km) und 5% an Biogas mit einer 90,42%igen CO₂-Reduzierung (auf der Basis der Angaben der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2017) enthalten sind, siehe Abbildung 4-5.

Jahr	CO ₂ - Äquivalente [g/kWh]	Stickoxide [g/kWh]	Partikel [g/kWh]
Mix 2018	28,6	0,162	0,003
Mix 2030	27,9	0,164	0,004

Abbildung 4-5: Globale und lokale Emissionen für die Bereitstellung von Erdgas für Deutschland/EU im Zeitverlauf

Je nach Genese verändern sich die Stickoxidemissionen des Bereitstellungspfades für Biogas gegenüber fossilem Erdgas um den Faktor 0,30 bis 1,13, jene für die Partikelemissionen um den Faktor 0,20 bis 4,33 (Fachverband Biogas und Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung). Diese Werte für die lokalen Emissionen weisen je nach Genese des Biogases eine enorme Bandbreite auf. Nachfolgend finden die Worst Case-Werte Anwendung. Diesen steht eine hochsignifikante CO₂-Reduzierung von 90,42 Prozent entgegen.

4.1.3 Wasserstoff

Für die Bereitstellung von komprimiertem Wasserstoff (Compressed Gaseous H₂, CGH₂) wird ein Mix aus Erdgasdampfreformierung (heute dominierend) und Elektrolyse mit erneuerbarem Strom angesetzt. In beiden Fällen wird vorausgesetzt, dass der Wasserstoff vor Ort an der Tankstelle produziert wird, da eine zentrale, großtechnische Elektrolyse-Infrastruktur nicht vorhanden ist und eine immense Investition erforderte, die nur die Bundespolitik durch strategische Entscheidung mit nachfolgender massiver Förderung initiieren kann, was heute aber noch nicht absehbar ist.

Im Fall von Wasserstoff aus Erdgasdampfreformierung wird der Strom für den Betrieb von Hilfsaggregaten (Kompressoren, Lüfter und Steuerung für die Reformieranlage sowie Betrieb der CGH₂-Tankstelle) aus dem Stromnetz (Niederspannungsebene) angesetzt. Die Zusammensetzung des deutschen Strom-Mixes 2018 basiert auf Angaben der AG Energiebilanzen, 2015, dem Bundesverband Erneuerbare Energien, 2015 und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, 2015, die auf das Gesamtjahr hochgerechnet wurden. Die Werte für 2030 basieren auf Angaben der DLR, 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. Der Wirkungsgrad der Elektrolyseanlage inklusive Feinreinigung des Wasserstoffs liegt bei etwa 60 % bezogen auf den unteren Heizwert

(entsprechend einem Stromverbrauch von rund 5 kWh pro Nm³ Wasserstoff). Bei Wasserstoff aus Wasserelektrolyse wird die CGH₂-Tankstelle inklusive des Elektrolyseurs als an das Mittelspannungsnetz angeschlossen angesetzt.

Rohstoffquelle	CO₂- Äquivalente [g/kWh]	Stickoxide [g/kWh]	Staub/Partikel [g/kWh]
2018: Erdgas (Dampfreformierung)	472,7	0,404	0,035
2018: Elektrolyse (erneuerbarer Strom)	13,3	0,013	0,001
2030: Erdgas (Dampfreformierung)	425,8	0,339	0,021
2030: Elektrolyse (erneuerbarer Strom)	7,6	0,010	0,002

Abbildung 4-6: Emissionen aus der Bereitstellung CGH₂ über unterschiedliche Bereitstellungspfade

Die Erzeugung von „regenerativem bzw. grünem“ Wasserstoff und seine Nutzung werden politisch propagiert. So sollen an den CEP (Clean Energy Partnership)-Tankstellen mindestens die Hälfte des Wasserstoffs aus erneuerbaren Energiequellen stammen (siehe Schnell, Retzke, 2010), so dass hier in 2030 optimistisch etwa 50 % des Wasserstoffs aus Elektrolyse als mit Strom aus regenerativen Energiequellen erzeugt angesetzt wird. Ob diese Quote trotz der Vorgaben tatsächlich mittelfristig erreicht werden wird, ist indes fraglich.

Rohstoffquelle	2018	2030
Erdgas	80%	50%
Erneuerbarer Strom	20%	50%

Abbildung 4-7: Wasserstoff-Herkunft im Zeitverlauf

Aus den Emissionen der einzelnen Bereitstellungspfade und den Anteilen je Zeithorizont ergeben sich die in Abbildung 4-8 angegebenen Emissionen für die Bereitstellung von Wasserstoff aus dem Wasserstoff-Mix.

Jahr	CO₂- Äquivalent [g/kWh]	Stickoxide [g/kWh]	Staub/Partikel [g/kWh]
Mix 2018	380,8	0,326	0,028
Mix 2030	216,7	0,175	0,012

Abbildung 4-8: Emissionen aus der Bereitstellung von CGH₂ im Zeitverlauf

4.1.4 Elektrische Energie/Strom

Für die Zusammensetzung des deutschen Strom-Mixes im Zeitverlauf wurden Szenarien erstellt, die für den Strom-Mix 2018 und die daraus resultierenden Emissionen auf Angaben der AG Energiebilanzen, 2015, des Bundesverbandes Erneuerbare Energien, 2015 und des Fraunhofer Instituts für Solare Energien, 2015 basieren. Die Daten für 2027 beziehen sich auf Daten der DLR, 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. Im Zeitverlauf ergeben sich somit für den Strom-Mix heute (2018) und mittelfristig (Jahr 2030) die in Abbildung 4-9 gezeigten Werte.

Jahr	CO₂- Äquivalent [g/kWh]	Stickoxide [g/kWh]	Staub/Partikel [g/kWh]
2018	583,6	0,623	0,159
2030	354,7	0,441	0,083

Abbildung 4-9: Emissionen für deutschen Strom (Mittelspannung) im Zeitverlauf

4.2 Fahrzeugproduktion

Zur Bestimmung der Umweltwirkungen der Busherstellung werden Daten für Solobusse mit unterschiedlichen Antriebstechnologien auf der Datenbasis nach R. Pütz, Diss. 2010 angesetzt. Die Daten beziehen sich auf Basis der Angaben der SWG auf eine betriebliche Nutzungsdauer beim ersten Betreiber von 14 Jahren. Für 2030 werden für das Basisfahrzeug und die unterschiedlichen Antriebsvarianten aufgrund langjährig optimierter Fertigungsstrukturen keine Änderungen angenommen. Eventuelle Migrationen hin zu „Purpose-Design“-Elektrofahrzeugen, die der Autor durchaus als

zielführend erachtet, sind hier aufgrund von Unwägbarkeiten nicht berücksichtigt, da hierfür eine grundlegende Änderung der Fertigungsstrukturen erforderlich wäre. Die in der Literatur je nach Quelle für eine Kilowattstunde Li-Ionen-Batteriekapazität angegebenen CO₂-Emissionen schwanken beträchtlich, so dass der pessimistische Wert aus der Studie der Schwedischen Energie-Agentur von 175 kg CO₂/kWh, der offenbar für Batterien des Herstellers Tesla gilt, hier nicht berücksichtigt wird. Zum Vergleich nennt das IFEU-Institut, 2016 Werte von 125 kg CO₂/kWh, die hier Berücksichtigung finden.

	CO₂-Äquivalent kg/Bus/a	NOx kg/Bus/a	PM kg/Bus/a
Diesel-EURO VI	2547,2	4,107	1,214
Diesel-Hybrid EURO VI	2675,2	4,423	1,505
CNG-EURO VI	3034,6	4,886	1,324
BZ-Hybrid	4552,0	7,131	2,685
Batterie-Opportunity (GL)	2812,1	4,737	2,120
Batterie-Overnight (NL)	3936,9	6,632	2,968
Trolley-Hybrid (HO)	2742,4	4,594	1,685

Abbildung 4-10: Jährliche Emissionen bei 14jähriger betrieblicher Nutzungsdauer für das Subsystem Fahrzeugherstellung

Berücksichtigt werden hier weder die vielfach angemahnten Rohstoffengpässe bei forcierter Serienproduktion von Traktionsbatterien noch die angeprangerten Gewinnungsbedingungen für die seltenen Erden in den Entwicklungsländern. Öko-Institut/ Agora-Energiewende (2017) kommen zu dem ermutigenden Ergebnis, dass die essentiellen Rohstoffe Lithium und Kobalt für ein schnelles, weltweites Wachstum der Elektromobilität ausreichend vorhanden sind, jedoch temporäre Verknappungen und Preissteigerungen nicht auszuschließen seien. Das Massachusetts Institute of Technology (MIT, 2017) sieht ebenfalls eine ausreichende Verfügbarkeit von Rohstoffressourcen für die Elektromobilität, bewertet aber die temporären Engpässe an Lithium und Kobalt weitaus kritischer und bezeichnet es als höchst wahrscheinlich, dass mittelfristig auf dem Weltmarkt eine Verknappung von Lithium und vor allem Kobalt eintreten wird. Auch der BDI sieht einen schneller wachsenden Rohstoffbedarf als Kapazitäten für die Förderung aufgebaut werden könnten.

4.3 Fahrbetrieb (TTW; Tank-to-Wheel)

Das Datengut für die Emissionen im realen Linienbetrieb basiert auf den PEMS-Messungen (Portable Emission Measurements) des Instituts BELICON an Euro-VI-Gelenkbussen in Gießen 2016 und unter Einbeziehung des Energieverbrauchs für Heizung/Klimatisierung. Bei der Erdgasbus-Variante wurde allerdings der aktuelle Benchmarksetter angesetzt, für den PEMS-Messungen in mit Gießener Einsatzcharakteristik vergleichbaren Zyklen vorliegen.

Oftmals wird für die Versionen der Elektromobilität lediglich der Energieverbrauch für die Traktion genannt, der bei Solobussen für SORT-2-Charakteristik in der Ebene bei etwa 1,0 bis 1,1 kWh/km liegt. Der Heizenergiebedarf wird dabei i.d.R. unzulässigerweise vernachlässigt. In nachfolgenden Abbildungen 4-11 und 4-12 sind die Energieverbräuche und Emissionen des Fahrbetriebs **inklusive** des Energieverbrauchs für Heizung/Klimatisierung für 2018 berücksichtigt. Für den Zeithorizont 2030 wurde für die verbrennungsmotorischen Antriebe mit Diesel und Erdgas eine Mild-Hybridisierung als Serienstand mit einer durchschnittlichen weiteren Verbrauchsreduzierung um 10% angenommen, während für die alternativen Antriebe des Spektrums Elektromobilität bereits für den Zeithorizont „heute“ nach den Erfahrungen des Instituts BELICON eine mittlere Rekuperationsrate von 25% über das gesamte Einsatzjahr unterstellt wurde.

	Verbrauch l DK-Äqu./100km	CO2 kg/km	NOx g/km	PM g/km
Diesel EURO III	43,53	1,15	12,94	0,240
Diesel EURO III + CRT	45,70	1,21	12,94	0,012
CNG EURO V/EEV	58,76	1,15	3,45	0,035
CNG EURO VI	56,94	1,18	0,66	0,002
BZ-Hybrid	29,97	0,00		
Batterie-Opportunity	15,56			
Batterie-Overnight	17,89			

Abbildung 4-11: Verbräuche und Emissionen von Solobussen im Fahrbetrieb im Jahr 2018, abgeleitet aus Praxismessungen im Linienbetrieb in Gießen, normiert auf 16,7 km/h (Mittelwert)

	Verbrauch I DK-Äqu./100km	CO2 kg/km	NOx g/km	PM g/km
Diesel EURO III	58,76	1,56	13,58	0,719
Diesel EURO III + CRT	61,70	1,64	13,58	0,036
CNG EURO V/EEV	79,33	1,56	3,62	0,104
CNG EURO VI	72,82	1,59	0,69	0,005
BZ-Hybrid	40,46	0,00		
Batterie-Opportunity	21,00			
Batterie-Overnight	24,15			

Abbildung 4-12: Verbräuche und Emissionen von Gelenkbussen im Fahrbetrieb im Jahr 2018, abgeleitet aus Praxismessungen im Linienbetrieb in Gießen, normiert auf 16,7 km/h (Mittelwert)

4.4 Ergebnisse der Ökologie-Bilanzen

Gemäß dem in Kapitel 2 vorgestellten Ansatz für die ganzheitliche Bilanzierung werden die in jedem Subsystem entstehenden Emissionen mit den zugehörigen externen Kosten aus der „Beschaffungsrichtlinie“ 2009/33/EG (Richtlinie zur Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge) multipliziert und aufsummiert, um ein vergleichbares **ökologisches Gesamtprofil** zu erhalten. Die in der o.g. Richtlinie vorgegebenen externen Kosten pro t der jeweiligen Emissionskomponente betragen für Partikel 87.000 €, für Stickoxide 4.400 € und für CO₂ 40 €. Bei den nachfolgenden Ökoprofilen wurde die heute (2018) bestehende Gießener Busflotte auf 100 Prozent normiert. Werte kleiner 100 Prozent bedeuten eine ökologische Verbesserung gegenüber der bestehenden SWG/MIT.BUS-Flotte, Werte größer 100 Prozent eine ökologische Verschlechterung.

4.4.1 Ökologischer Vergleich 2018 (“heute”)

Die ökologische **Gesamtbewertung** für den Zeithorizont **heute (2018)** weist aus, dass für eine umfassende Nachhaltigkeit – unter Berücksichtigung lokaler und globaler Emissionen sowie des Energieverbrauchs – bei den verglichenen Varianten heute keine nennenswerten Verbesserungen durch alternative elektrische Antriebsvarianten erreicht werden. Zeitnah wäre eine Umstellung der Busflotte auf die Erdgastechnik auch mit fossilem Erdgas eine veritable Option im ökologisch nachhaltigen ÖPNV,

siehe Abbildung 4-13. Die ökologisch hochsignifikant günstigste Option bietet die Verwendung von Biogas. Beim heute bereits in Gießen durchgeführten Einsatz von 100% Biogas (CO₂-Minderungspotenzial >90 Prozent) des Marktführers Verbio wäre die Erdgasteknik in Verbindung mit Euro-VI-CNG-Antrieben heute die sauberste verfügbare Antriebstechnik.

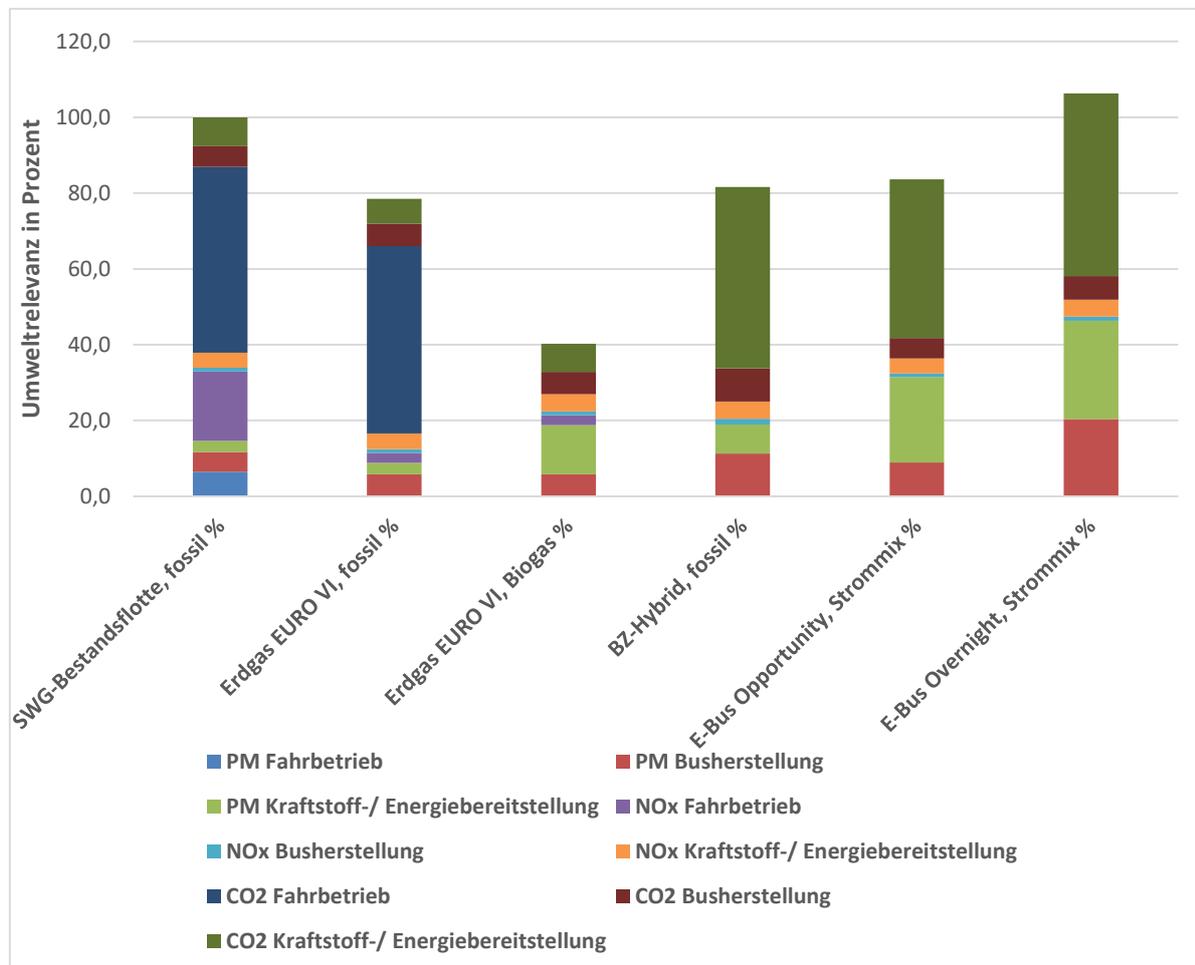


Abbildung 4-13: Systembezogene Umweltrelevanz 2018 anhand externer Kosten gemäß 2009/33/EG für Solobusse unter den Randbedingungen der SWG-Flotte im gesamten Lebenszyklus (14 Jahre)

Weitere Optionen wie der Einsatz biogener synthetischer Dieselmotorkraftstoffe (Biomass-to-Liquids; BtL) sowie von Strom und Wasserstoff aus ausschließlich regenerativen Energien böten weiteres ökologisches Potenzial, das künftig aktiv erschlossen werden sollte. Aufgrund der Energiewende mit Abschaltung der Atomkraftwerke und ersatzweiser Nutzung von Braunkohle und Steinkohle hatte sich der Strom-Mix jedoch vorübergehend sogar ökologisch verschlechtert. Biogene Kraftstoffe der 2. und 3. Generation (z.B. Biomass-to-Liquids; BtL) sind für die Dieselmotortechnik aktuell (und wohl auch

mittelfristig) nur in geringsten Mengen verfügbar. Zukünftige Entwicklungen werden sich vermehrt auch biogenem Dieseltreibstoff aus Algen und der Herstellung von synthetischen flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen aus regenerativ erzeugtem Strom (Power-to-Liquids, PtL; „E-Fuel“ und Power-to-Gas, PtG; „E-Gas“) widmen, was jedoch erst langfristig Marktrelevanz erreichen wird.

Die ökologische Bewertung ausschließlich der **global wirksamen Emissionen** für den Zeithorizont **heute (2018)** zeigt eine Dominanz der globalen Emissionen mit bis zu über 60 Prozent am gesamten ökologischen Profil (externe Kosten). Bezogen auf die globalen Emissionen wären heute moderate Verbesserungen durch alternative Antriebsvarianten der Elektromobilität gegenüber der bestehenden Flotte sowie gegenüber einer Euro-VI-Erdgasflotte mit fossilem Erdgas erreichbar, jedoch wäre die konkurrenzlos CO₂-günstigste Option der Einsatz von Biogas im CNG-Euro-VI-Antrieb, vgl. Abbildung 4-14.

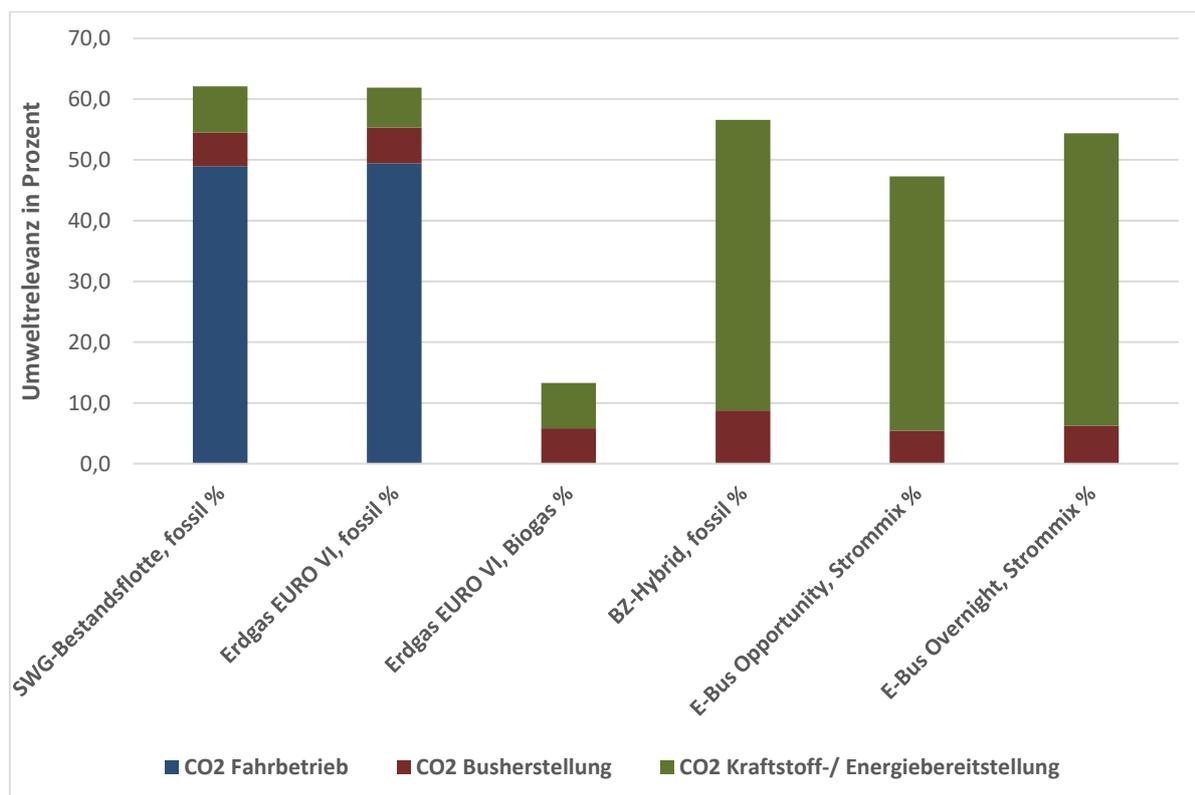


Abbildung 4-14: Systembezogene globale Umweltrelevanz 2018 anhand externer Kosten gemäß 2009/33/EG für Solobusse unter den Randbedingungen der SWG-Flotte im gesamten Lebenszyklus (14 Jahre)

Demgegenüber offenbart die ökologische Bewertung ausschließlich der **lokal wirksamen Emissionen im Fahrbetrieb** für den Zeithorizont **heute (2018)** Vorteile zugunsten der alternativen elektrischen Antriebsoptionen aufgrund der lokalen Nullemission vor Ort, siehe Abbildung 4-15. Jedoch muss dieser Vorteil angesichts der mit der Stufe Euro VI bei konventionellen verbrennungsmotorischen Antrieben erreichten „**Nahe-Null-Emission**“ relativiert werden, denn die lokalen Emissionen des Fahrbetriebs machen heute bei einer Euro-VI-Busflotte nur noch rund 3 Prozent des gesamten Umweltprofils aus. Je nach Umgebungsluftniveau können die lokalen Emissionen nach Abgasnachbehandlung sogar durchaus geringer sein, was gar einem „Reinigen der Umgebungsluft“ entspräche.

Durch die Umstellung der Gießener Busflotte auf Euro-VI-Erdgasfahrzeuge ließen sich im Vergleich zur aktuellen Bestandsflotte (2018) **jährlich** etwa 210 kg Feinstaub und mehr als 10,5 t NOx im Einsatzbereich der Busse **vermeiden**. Zum Vergleich würde durch die lokale Nullemission von Elektrobussen jährlich lokal etwa 220 kg Feinstaub und knapp 12,3 t NOx vermeiden. Das entspricht im Vergleich zu einer Erdgasbusflotte also lediglich einer zusätzlichen Vermeidung von knapp 5 Prozent Feinstaub und knapp 15 Prozent Stickoxide.



Abbildung 4-15: Systembezogene lokale Umweltrelevanz 2018 ausschließlich des Fahrbetriebs anhand externer Kosten gemäß 2009/33/EG für Solobusse unter den Randbedingungen der SWG-Flotte im gesamten Lebenszyklus (14 Jahre)

4.4.2 Ökologischer Vergleich 2030 („mittelfristig“)

Bis zum Jahr 2030 soll laut BMWi das Potenzial Deutschlands zur Steigerung des Stromverbrauchs aus Solar- und Windenergie soweit verbessert werden, dass 40 bis 45 Prozent des in Deutschland verbrauchten Stroms aus erneuerbaren Energien produziert werden. Laut dem Pariser Klimaschutzabkommen wurde von der EU insgesamt eine CO₂-Reduzierung um 28 Prozent bis 2021 zugesagt. Deutschland will im Vergleich zum Jahr 1990 bis zum Jahr 2020 die CO₂-Emissionen gar um 40 Prozent senken. Die Erreichbarkeit dieses Ziels ist indes sehr fraglich, da bis zum Jahr 2015 lediglich eine Reduzierung um 27 Prozent zu verzeichnen war. Auf der Basis der in den Kapiteln 4.1 bis 4.3 erläuterten Daten ergeben sich die in Abbildung 4-16 gemäß EU-Beschaffungsrichtlinie bilanzierten ökologischen Profile je nach Antriebstechnik. Als Referenz dient wieder die heutige SWG-Busflotte (2018).

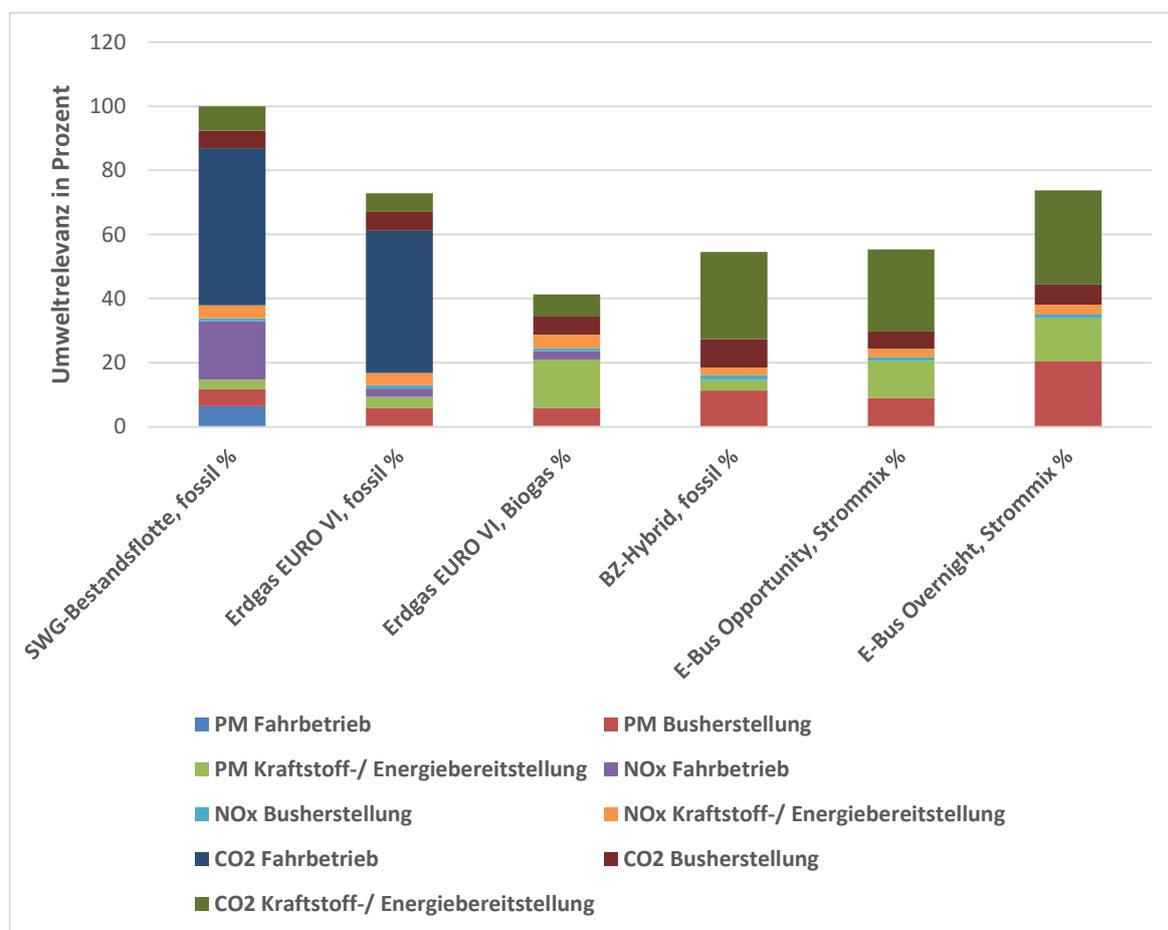


Abbildung 4-16: Systembezogene Umweltrelevanz 2030 anhand externer Kosten gemäß 2009/33/EG für Solobusse unter den Randbedingungen der SWG-Flotte im gesamten Lebenszyklus (14 Jahre)

Die ökologische Gesamtbewertung in Abbildung 4-16 weist aus, dass **mittelfristig (2030)** für eine umfassende Nachhaltigkeit – unter Berücksichtigung lokaler und globaler Emissionen sowie des Energieverbrauchs – bei den verglichenen Varianten unter den mittleren SWG-Randbedingungen die Umweltprofile der alternativen elektrischen Antriebstechnologien BZ-Hybrid und Opportunity Charger Vorteile gegenüber einer Euro-VI-Erdgasbusflotte mit **fossilem** Erdgas erreichen können, wenn sich die hohen politisch erwarteten Reduktionsziele (z.B. Anteil regenerativer Energien) auch tatsächlich einstellen werden. So wurde beispielsweise für die Wasserstoff-Brennstoffzellen-Hybridtechnik von einem regenerativen Energieanteil bei der Wasser-Elektrolyse von 50 Prozent ausgegangen, wobei jedoch – trotz der politisch induzierten Maßgabe – die flächendeckende Verfügbarkeit der erforderlichen Hydrolyse-, Verteilungs- und Betankungs-Infrastruktur sehr fraglich ist und Verkehrsunternehmen die zugehörige Infrastruktur hier in Kooperation mit den Energieversorgern „on-site“ selbst aufbauen müssten. Die Erdgastechnik mit **Biogas** böte bei den globalen Emissionen auch in 2030 weiterhin die **beste ökologische Option**. Diese Aussage trifft auch bei isolierter Betrachtung der globalen Emissionen zu, siehe Abbildung 4-17. Die Tatsache der ohnehin unspezifischen, vernachlässigbaren lokalen Emissionsvorteile der Elektromobilität besteht aufgrund der bereits mit abgasnachbehandelten Euro-VI-Antrieben erreichten Nahe-Null-Emission selbstverständlich fort.

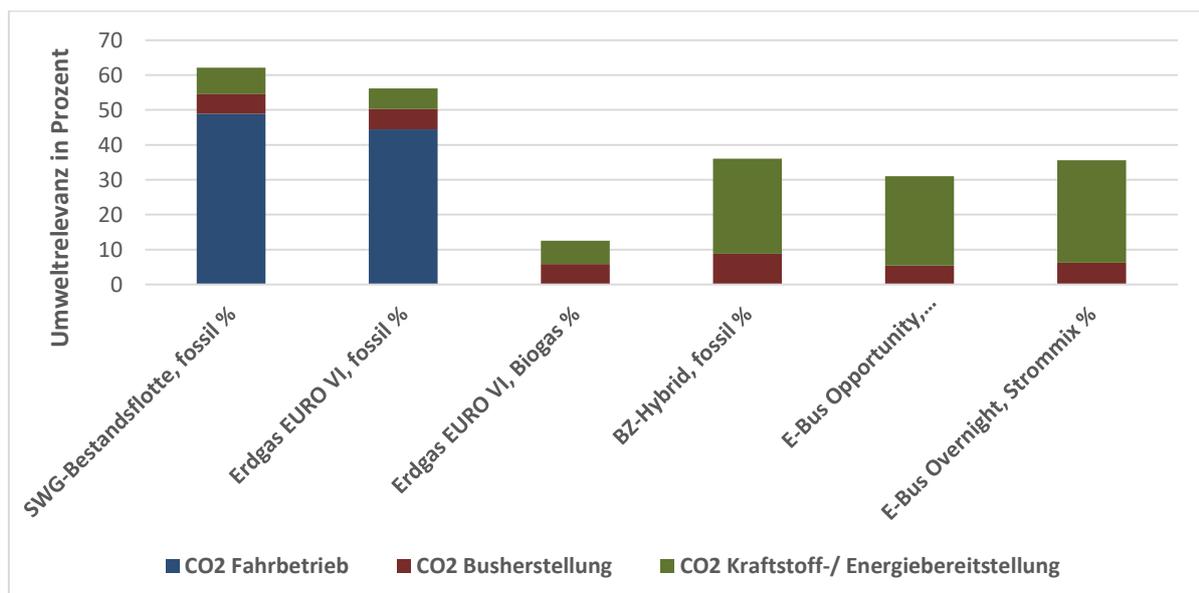


Abbildung 4-17: Systembezogene globale Umweltrelevanz 2030 anhand externer Kosten gemäß 2009/33/EG für Solobusse unter den Randbedingungen der SWG-Flotte im gesamten Lebenszyklus (14 Jahre)

5 Ökonomischer Vergleich von konventionellen und alternativen Antrieben

Nachfolgend erfolgt nun die ökonomische Analyse der derzeit diskutierten alternativen Antriebskonzepte der Elektromobilität und des vollständigen Übergangs auf eine Erdgasflotte im Vergleich zur SWG/MIT.BUS-Bestandsflotte 2018 als Referenz unter den Randbedingungen der SWG. Dort wo Daten fehlen, werden Referenzdaten eines mittleren, gut geführten Stadtverkehrsbetriebs angesetzt.

Die Kosten der Fahrzeuge setzen sich bei nachfolgender Analyse zusammen aus den auf die Fahrleistung umgelegten Kosten für:

- Fahrzeug-Kapitaldienst;
- Ersatzinvestitionen (z.B. für einen während der Lebenszeit des Busses notwendigen Batteriewechsel);
- Kraftstoffe bzw. Energie;
- Instandhaltung;
- Infrastruktur-Mehrkosten gegenüber Dieselbetrieb (nur exemplarisch darstellbar).

5.1 Fahrzeuginvestkosten und Ersatzinvestitionen

Die **Fahrzeug-Investitionskosten** setzen sich dabei aus Gründen der Objektivierung aus den Kosten der verwendeten Komponenten (Fahrzeugkonfiguration **auf Komponentenbasis**) im Bezug zum aktuellen **Dieselbus-Marktpreis** zusammen. Es wird ein Linienbus in SWG-Vollausstattung als Basis angesetzt. Die für die Berechnung verwendeten typischen Fahrzeugkonfigurationen der verschiedenen Antriebskonzepte sind im Zeitverlauf am Beispiel des Solobusses in den Abbildungen 5-1 bis 5-4 dargestellt. Dabei werden für die Optionen der Elektromobilität während der betrieblichen Nutzungsdauer von 14 Jahren eine zweite Batterie bzw. eine zweite Brennstoffzelle angesetzt, da aktuelle Erfahrungen hinsichtlich der Zyklusfestigkeiten der Batterien und Garantien der Elektrobushersteller darauf hindeuten. Für den **Zeithorizont mittelfristig** werden **signifikante Investkosten-Senkungen bei allen alternativen Antrieben** erwartet.

Nach Vorgabe der SWG soll nachfolgend die Förderung außer Acht gelassen werden, da in Hessen nach dem Jahr 2003 keine Förderung mehr erfolgt ist, da eine Förderung

mit dem hessischen Ausschreibungsweg unvereinbar ist. Für Elektrobusse des Typs Opportunity-Charger und Overnight-Charger wird jedoch eine Anschubfinanzierung gemäß der der Verlautbarung des Bundesumweltministeriums BMUB v. 26.02.2018 in Höhe von 80 Prozent der beihilfefähigen investiven Fahrzeug-Mehrkosten und 40 Prozent der beihilfefähigen Infrastruktur(mehr)kosten angesetzt, während für den Brennstoffzellen(BZ)-Hybrid gemäß den aktuellen Gepflogenheiten 60 Prozent der investiven Mehrkosten gegenüber einem Euro-VI-Dieselbus angesetzt werden. Zuvor förderte bereits mit der aktualisierten Förderrichtlinie Elektromobilität das Bundesverkehrsministerium BMVI die Beschaffung von Elektrofahrzeugen und die dafür erforderliche Ladeinfrastruktur (Antragsschluss war 31. Januar 2018). Das Antrags- und Bewilligungsverfahren wurde nunmehr vereinfacht, so dass die Projekte noch schneller umsetzbar sind. Unterstützt werden hier kommunale Fahrzeugflotten, z.B. Abfall-Entsorgungsfahrzeuge und der Öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV), z.B. mit Elektrobussen. Die Beschaffung von Elektrofahrzeugen im Taxigewerbe und bei Car-Sharing-Unternehmen wird ebenfalls gefördert. Für das Sofortprogramm stehen 1 Milliarde Euro bereit.

Element	Bemerkungen	2018	2030	Delta (%)
Grundfahrzeug	inkl. HLK, IBIS etc.	145.000	145.000	0,0
Energiespeicher	Druckgasanlage	35.000	35.000	0,0
Energiewandler	Verbrennungsmotor	29.000	29.000	0,0
	Automatikgetriebe	16.000		
Antriebsstrang	(in 2027 mild-hybridisiert)		22.000	37,5
	Antriebsachse	15.000	15.000	0,0
Summe		240.000	246.000	2,5

Abb. 5-1: Fahrzeug-Investkosten für Erdgas (CNG)-Solobusse nach SWG-Ausstattung für 2018 (heute) und 2030 (mittelfristig) – ohne Busförderung

Element	Bemerkungen	Größe kWh / kW	Systemkosten 2018 €/kWh	Systemkosten 2030 €/kWh	2018	20307	Delta (%)
Grundfahrzeug	inkl. HLK, IBIS etc.				145.000	145.000	0,0
Energiespeicher	Batterie	30	900	300	27.000	9.000	-66,7
	Wasserstofftank				20.000	20.000	
	Elektromotoren +				90.000		
Energiewandler	Leistungselektronik					30.000	-66,7
	Brennstoffzelle	200	3600	500	720.000	100.000	
Antriebsstrang	Antriebsachse				15.000	15.000	0,0
Summe	mit 1 Batterie und 1				1,0E+06	319.000	-68,6
Fahrzeug	Brennstoffzelle						
	2. Batterie	30	300	300	9.000	9.000	0,0
	2. Brennstoffzelle	200	500	500	100.000	100.000	
Summe Fahrzeug 12 a	2 Batterien, 2 Brennstoffzellen				1,1 Mio.	428.000	-62,0

Abb. 5-2: Fahrzeug-Investkosten für BZ-Hybrid-Solobusse nach SWG-Ausstattung für 2018 (heute) und 2030 (mittelfristig) – ohne Busförderung

Die Förderung von 60 Prozent der Mehrkosten gegenüber einem Diesellbus bedeutet z.B. für einen Brennstoffzellenhybrid-Solobus 492.300 € und wird im Weiteren berücksichtigt.

Element	Bemerkungen	Größe kWh	Systemkosten 2018 €/kWh	Systemkosten 2030 €/kWh	2018	2030	Delta (%)
Grundfahrzeug	inkl. HLK, IBIS etc.				145.000	145.000	0,0
Energiespeicher	Batterie	100	900	300	90.000	30.000	-66,7
	Elektromotoren +				90.000	30.000	-66,7
Energiewandler	Leistungselektronik						
Antriebsstrang	Antriebsachse				15.000	15.000	0,0
Summe					313.000	220.000	-34,9
Fahrzeug	mit 1 Batterie						
	2. Batterie	180	300	300	54.000	54.000	0,0
Summe Fahrzeug 12 a	2 Batterien				394.000	274.000	-30,4

Abb. 5-3: Fahrzeug-Investkosten für Opportunity-Charger-Solobusse nach SWG-Ausstattung für 2018 (heute) und 2030 (mittelfristig) – ohne Busförderung

Die Förderung von 80 Prozent der Mehrkosten gegenüber einem Dieselbus bedeutet für einen Opportunity-Charger-Solobus in der o.g. Ausführung 155.200 € und wird im Weiteren berücksichtigt.

Element	Bemerkungen	Größe kWh	Systemkosten 2018 €/kWh	Systemkosten 2030 €/kWh	2018	2030	Delta (%)
Grundfahrzeug	inkl. HLK, IBIS etc.				145.000	145.000	0,0
Energiespeicher	Batterie	350	900	300	315.000	105.000	-66,7
	Elektromotoren +				90.000	30.000	-66,7
Energiewandler	Leistungselektronik						
Antriebsstrang	Antriebsachse				15.000	15.000	0,0
Summe							
Fahrzeug	mit 1 Batterie				565.000	295.000	-47,8
	2. Batterie	350	300	300	105.000	105.000	0,0
Summe Fahrzeug 12 a	2 Batterien				670.000	400.000	-40,3

Abb. 5-4: Fahrzeug-Investkosten für Overnight-Charger-Solobusse nach SWG-Ausstattung für 20187 (heute) und 2030 (mittelfristig) – ohne Busförderung

Die Förderung von 80 Prozent der Mehrkosten gegenüber einem Dieselbus bedeutet für einen Overnight-Charger-Solobus in der o.g. Ausführung 376.000 € und wird nachfolgend berücksichtigt.

Dabei werden Elektrobusse basierend auf automotiver Elektrotechnik (Elektromotoren, Leistungselektronik) mit einer i.d.R. 12- bis 16-jährigen betrieblichen Lebensdauer berücksichtigt. Wird bei der Weiterentwicklung der Elektromobilität eine sehr optimistische Marktdurchdringung unterstellt, ergäbe sich eine Marktdurchdringung für Fahrzeugneuzugänge im Zeitverlauf wie bereits in Abb. 3-9 dargestellt. Diese Marktentwicklung wird jedoch aufgrund des erst nach 2030 erwarteten Technologiesprungs der Batterietechnik wahrscheinlich in der Realität kaum erreichbar sein.

5.2 Kraftstoff- bzw. Energiekosten

Die **Kraftstoff- und Reagenzmittelkosten** je Antriebstechnik sind in den Abbildungen 5-5 bis 5-8 dokumentiert. Für die Entwicklung der Kraftstoffpreise wurden Abschätzungen gemäß IFEU/BELICON, 2015, der Energiereferenzprognose von 2014 und A. Schulz, Diss. 2015 sowie auf der Basis weiterer wissenschaftlicher Veröffentlichungen und Angaben der Energieunternehmen angesetzt. Demnach ist mittelfristig ein signifikanter Anstieg der Kraftstoffpreise bei allen Energieträgern, mit der Ausnahme von Wasserstoff, zu erwarten. Durch die Entkoppelung von Erdgas- und Dieselpreis und die Erschließung weiterer Erdgasfelder ist der Preisanstieg beim Erdgas geringer. Die Kraftstoffverbräuche bei den Verbrennungsmotor-Optionen werden mittelfristig durch den Standard einer Mild-Hybridisierung und weitere innermotorische Optimierungen moderat sinken. Bei den elektrischen Antrieben, die heute schon über Bremsenergie- rekuperation und ein Energiemanagement der (elektrifizierten) Nebenverbraucher verfügen, wird keine weitere Verbrauchsreduzierung angenommen, da mittelfristig (vor 2030) kein serienmäßiger Übergang auf die Post-Li-Ionentechnik und auf Purpose Design zu erwarten ist.

	Erdgas/Biogas	2018	2030	Delta (%)
Erdgaskosten pro kg	€/kg	0,78	1,05	34,6
Verbrauch Erdgas pro 100 km	Nm ³ / 100 km	56,94	54,09	-5,0
Jahresfahrleistung	km / (Fz*a)	46.000	46.000	-
Kraftstoffkosten pro Jahr	€ / (Fz*a)	16.981	21.686	27,7
Kraftstoffkosten pro Fz-Kilometer	€ / Fz-km	0,37	0,47	27,7

Abb. 5-5: Kraftstoffkosten für 2018 (heute) und 2030 (mittelfristig) für die Erdgastechnik (Solobus)

	Wasserstoff CGH₂	2018	2030	Delta (%)
Wasserstoffkosten pro kg	€/kg	7,50	5,00	-33,3
Verbrauch H ₂ pro 100 km	kg / 100 km	9,08	9,08	-
Jahresfahrleistung	km / (Fz*a)	46.000	46.000	-
Kraftstoffkosten pro Jahr	€ / (Fz*a)	31.331	20.887	-33,3
Kraftstoffkosten pro Fz-Kilometer	€ / Fz-km	0,68	0,45	-33,3

Abb. 5-6: Kraftstoffkosten für 2018 (heute) und 2030 (mittelfristig) für die Druckwasserstofftechnik (Solobus)

	Opportunity-Charger	2018	2030	Delta (%)
Stromkosten pro kWh	€/kWh	0,21	0,22	4,8
Stromverbrauch	kWh / 100 km	155,56	155,56	-
Jahresfahrleistung	km / (Fz*a)	46.000	46.000	-
Kraftstoffkosten pro Jahr	€ / (Fz*a)	14.740	16.084	9,1
Kraftstoffkosten pro Fz-Kilometer	€ / Fz-km	0,32	0,34	9,1

Abb. 5-7: Energiekosten für 2018 (heute) und 2030 (mittelfristig) für Opportunity-Charger Batteriebus (Solobus)

	Overnight-Charger	2018	2030	Delta (%)
Stromkosten pro kWh	€/kWh	0,21	0,22	4,8
Stromverbrauch	kWh / 100 km	178,89	178,89	-
Jahresfahrleistung	km / (Fz*a)	46.000	46.000	-
Kraftstoffkosten pro Jahr	€ / (Fz*a)	15.223	18.104	18,9
Kraftstoffkosten pro Fz-Kilometer	€ / Fz-km	0,33	0,39	18,9

Abb. 5-8: Energiekosten für 2018 (heute) und 2030 (mittelfristig) für Overnight-Charger Batteriebus (Solobus)

5.3 Instandhaltungskosten

Die **Instandhaltungskosten** sind einerseits von den **Personalkosten**, mit den jeweiligen Personalkennzahlen und den durchschnittlichen Jahresgehältern für Werkstattmitarbeiter, sowie den **Materialkosten** abhängig. Laut Angabe der SWG/MIT.BUS ist eine Personalkennzahl der Instandhaltung von 0,05 anzusetzen (Quelle: Benchmark 2014), welche laut den umfangreichen Erfahrungen des Autors im Bestbereich anzusiedeln ist.

		Dimension	BZ-Hybrid	Opportunity-Charger	Overnight-Charger
Werkstattpersonal	pro Bus	M / Fz	+0,09	+0,02	+0,02

Abb. 5-9: Durchschnittliche Personalkennzahlen-Aufschläge je Antriebstechnik gegenüber Erdgasfahrzeugen in 2018 nach aktueller Beobachtung (Solobus)

		Dimension	BZ-Hybrid	Opportunity-Charger	Overnight-Charger
Werkstattpersonal	pro Bus	M / Fz	+0,02	0,0	0,0

Abb. 5-10: Durchschnittliche Personalkennzahlen-Aufschläge je Antriebstechnik gegenüber Erdgas, prognostiziert für das Jahr 2030 (Solobus)

5.4 Infrastruktur-Investkosten

Da die SWG über eine Diesel- und Erdgas-Betankungsinfrastruktur auf dem Betriebs- hof verfügen, müssen bei einem Wechsel auf eine andere Antriebstechnik zu den in Kapitel 5.1 bis 5.3 genannten Fahrzeugkosten noch die Infrastrukturkosten für die Energiezuführung der jeweiligen Elektrobuss-Option kalkuliert werden. Die Infrastrukt- urkosten für alternative Antriebe sind neben der Flottengröße jedoch hochsignifikant von den lokalen Gegebenheiten sowie dem Betriebsmuster und dem Liniennetz ab- hängig. Es ist ausdrücklich nicht Gegenstand dieser Studie, die erforderlichen Infra- strukturlkosten detailliert zu ermitteln, da dies den Rahmen der Studie massiv sprengen würde. Deshalb soll hier hilfsweise nach IFEU/BELICON, 2015 exemplarisch von einer Infrastruktur für eine **Linie von 15 km Länge (in jeder Richtung)** ausgegangen wer- den, **die mit 15 Bussen im 7,5-Minuten-Takt bedient** wird.

Bei den betriebshofgebundenen Technologien der Energiezuführung (Tankstellen für Dieselkraftstoff, Erdgas/Biogas und Wasserstoff sowie Overnight Charging/elektrische Nachtauladung) kann von der exemplarischen 15-km-Linie auf das Liniennetz hoch- skaliert werden, was näherungsweise auch beim Opportunity Charging möglich ist, da eine Mehrfachnutzung von Ladestationen durch mehrere Linien ohnehin – und erst Recht bei ÖPNV-üblichen Verspätungen in den Rush Hours – nahezu ausgeschlos- sen ist und stattdessen in praxi mehrere Ladepunkte pro Ladestation vorgesehen wer- den müssten. Sicherlich sind dabei je Bediengebiet Synergien möglich, die jedoch in jedem Fall individuell im Bediengebiet belastbar auf tatsächliche Realisierbarkeit ana- lysiert werden müssen, was in gesonderten Studien detailliert zu untersuchen wäre. Ein Hochskalieren auch beim Opportunity Charging wäre auf Basis einer „Worst Case“-Betrachtung zielführend.

Für eine leistungsstarke **Erdgastankstelle** für eine Flotte mit 100 Bussen ist je nach Druckniveau zwischen 400.000 und 500.000 € zu kalkulieren, vgl. auch Abbildung

5-11. Die Kostentreiber sind dabei die Kompressoren. Aus Gründen der Redundanz sind in der Regel immer zwei Verdichter anzusetzen, wobei eine solche Verdichter-Doppeleinheit mit etwa 220.000€ anzusetzen ist. Bei mehr als 100 Bussen und einer schnellen Betankung bis zum letzten Bus müssten ein oder gar zwei weitere Verdichter zusätzlich kalkuliert werden. Für das Szenario eines vollständigen Umstiegs auf die Erdgastechnik wäre für Gießen zur Absicherung der Verfügbarkeit analog den Gegebenheiten bei anderen Verkehrsunternehmen eine zusätzliche Erdgastankstelle zielführend, so dass nachfolgend diese Option kalkulatorisch berücksichtigt wird. Aufgrund stetig steigender Sicherheitsanforderungen muss beim Anschluss an ein Hochdrucknetz im Zeitverlauf evtl. mit steigenden Kosten gerechnet werden.

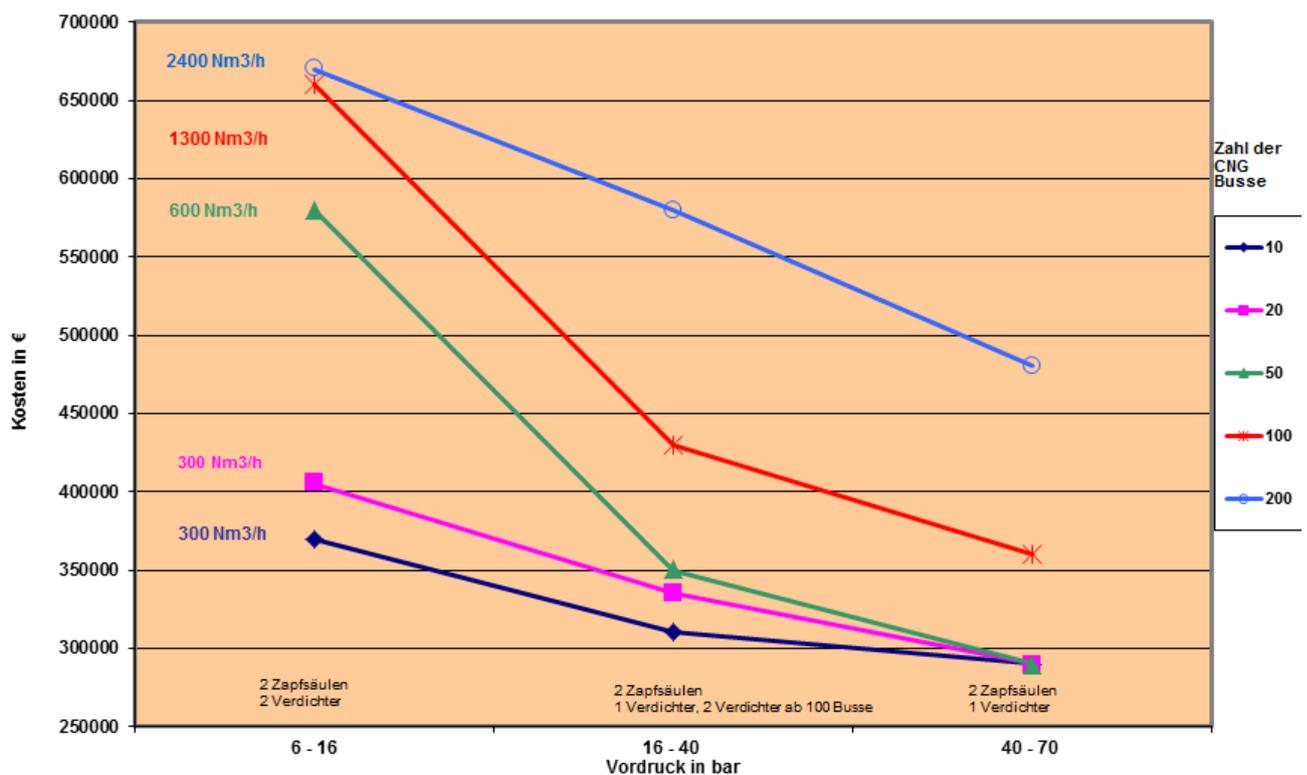


Abb. 5-11: Beispiel für die Erdgas-Tankstellen-Investkosten in Abhängigkeit des Vordrucks und der Anzahl der zu betankenden Busse

Für einen **Schnellladepunkt** beim Opportunity-Charger (GL) werden Kosten in Höhe von 250.000 € angenommen. Dies stellt indes die untere Grenze der Kosten nach Aussagen vieler Experten dar, insbesondere gilt dies für induktive Energiezuführung. Abhängig von den Bedingungen vor Ort können somit auch Kosten von bis zu 400.000 € je Ladepunkt auftreten.

	Infrastruktur	Auslegung	Anzahl bei 15 Bussen	Skalierung
Erdgas	CNG-Tankstelle mit 2 Verdichtern	mittelgroße Station	15% Anteil	keine
Brennstoffzelle	Wasserstofftankstelle	mittelgroße Station	25% Anteil	keine
Opportunity Charger (Gelegenheitslader, GL)	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
Overnight Charger (Übernachtslader, NL)	Ladepunkt Betriebshof	je 100 kW	15	Anzahl Busse
	Unterwerk Betriebshof	1,5 MW	1	keine

Abb. 5-12: Exemplarische Annahmen für die Infrastruktur bei 15 km Linienlänge

	Infrastruktur	Kosten spezifisch [€]	Bezug	Kosten Linie [€]
Erdgas	CNG-Tankstelle, 2 Verdichter	450.000	je Tank- stelle	67 500
Brennstoffzelle	Wasserstofftankstelle	3 753 000	je Tank- stelle	938 250
Opportunity Charger (Gelegenheitslader, GL)	Schnellladepunkt	250 000	je LP	1 000 000
	Ladepunkt Betriebshof	15 900	je LP	238 500
	Unterwerk Betriebshof			430 000
Overnight Charger (Übernachtslader, NL)	Ladepunkt Betriebshof	29 000	je LP	435 000
	Unterwerk Betriebshof			860 000

Abb. 5-13: Anhaltswerte für die Infrastrukturkosten bei 15 km Linienlänge und Einsatz von 15 Bussen im 7,5-Minuten-Takt

Zur Abschätzung der Infrastrukturkosten wird vereinfachend eine gesamte **Linienlänge des SWG-Netzes von 115 km** angesetzt, die im Ausbauzustand mit einem 7,5-Minuten-Takt bedient werden soll. Auch wenn bei den SWG im Mittel aktuell eine andere Taktfrequenz der Bedienung besteht, sollte die Infrastruktur auf die höhere Taktfrequenz ausgelegt sein, um Grenzfälle und potenziellen Ausbau zu erfassen und damit zukunftsfähig zu sein. Abbildung 5-14 dokumentiert die geschätzten, globalen Energiezuführungs-Infrastrukturkosten des gesamten Netzes je Antriebstechnologie. Dabei wurde für den Gelegenheitslader eine Synergie der Nutzung der Schnellladepunkte unterstellt.

	Infrastruktur	Kosten Netz [€]
Erdgas	1 zusätzliche CNG-Tankstelle à 2 Verdichter (insgesamt 2 CNG-Tankstellen)	450 000 (ohne Förderung)
Brennstoffzelle	1 Wasserstofftankstelle	4 300 000 (inkl. Förderung)
Opportunity Charger (Gelegenheitslader, GL)	Schnellladepunkte	7 700 000 (inkl. Förderung)
	Ladepunkte Betriebshöfe	
	Unterwerke Betriebshöfe	
Overnight Charger (Übernachtslader, NL)	Ladepunkte Betriebshöfe	2 400 000 (inkl. Förderung)
	Unterwerke Betriebshöfe	

Abb. 5-14: Anhaltswerte für die Infrastrukturkosten des gesamten SWG-Netzes bei 115 km Linienlänge aus Skalierung von Abb. 5-13

Die in Tabelle 5-14 aufgeführten Energiezuführungskosten müssen jeweils auf die Fahrzeuganzahl und jährlichen Laufleistungen bezogen und **über 25 Jahre abgeschrieben** werden. Im Rahmen des Elektromobilitäts-Förderprogramms der Bundesregierung wird für die Infrastruktur ein maximaler Fördersatz von 40% gewährt, der hier auch berücksichtigt wird.

Für die Instandhaltung der Infrastruktur sollten pauschal zusätzlich jährlich 2 % der Investitionskosten angesetzt werden.

Bei der Implementierung von batterie- und brennstoffzellenbetriebenen Bussen im ÖPNV-Netz sind einige grundlegende Anforderungen wie folgt zu beachten:

- Die Sicherheit für Fahrgäste, Fahrpersonal und Passanten muss gewährleistet sein. Dabei darf weder an Haltestellen noch beim Betrieb der Fahrzeuge eine Gefährdung für Personen ausgehen.
- Der Fahrkomfort darf nicht eingeschränkt werden. Dies gilt im Besonderen im Blick auf Fahrgäste und Fahrer hinsichtlich der Heizung/Klimatisierung. Bei Bussen mit Verbrennungsmotor entsteht prozessbedingt eine recht hohe Menge an thermischer Energie. Beim elektrischen Antrieb steht diese Prozesswärme zum Heizen der Busse nicht mehr zur Verfügung, es muss also eine anderweitige Wärmequelle erarbeitet werden um eine ausreichende Heizung, auch bei sehr tiefen Temperaturen, zu ermöglichen. Diese Thematik ist Gegenstand weiterer Studien, und soll in dieser Arbeit nicht weiter erörtert werden.
- Auch die Fahrzeiten, also die mittlere Zyklusgeschwindigkeit, sollten sich durch einen Elektroantrieb nicht signifikant verändern. Vor allem systemtechnisch bedingte Standzeiten (Batterieaufladung- und -wechsel) sind dort vorzusehen, wo der Linienumlauf am geringsten beeinflusst wird. Die Linienumlaufzeiten und der erforderliche Personalwirkungsgrad dürfen sich nicht verschlechtern.
- Die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems sollte unabhängig von Witterungseinflüssen sein. Wind, Kälte, Hitze, Regen, Schneefall oder auch Eis und Schnee auf der Fahrbahn dürfen die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems nicht herabsetzen, oder gar Gefahren hieraus entstehen lassen.
- Es dürfen keine Ausfälle auf der Strecke („Liegenbleiber“) wegen mangelnder Energie in der Batterie entstehen. Die Systeme müssen so ausgelegt sein, dass auch bei typischen ungeplanten Vorkommnissen (z.B. Stau in der Rush-Hour während die Heizung bzw. Klimaanlage auf Maximalleistung läuft) die Kapazität des Energiespeichers ausreicht, um sicher zur nächsten Auflade-/Wechselstelle zu kommen.
- Kühlung der Batterien: Die Batterien unterliegen in Folge des Innenwiderstandes sowohl beim Laden, als auch beim Entladen während des Fahrbetriebs einer Erwärmung. Diese Erwärmung kann ein Problem für die Sicherheit darstellen und muss überwacht werden. Aber auch der Alterungsprozess ist abhängig vom Temperaturbereich während des Betriebs und der Lagerung. Um die Lebensdauer aufgrund kalendarischer und zyklischer Alterung der Batterien nicht unnötig zu beschränken, ist eine geeignete Kühlung vorzusehen.

- Die Qualität der erforderlichen Ausbildung muss sichergestellt sein. Durch die elektrische Ausrüstung in den Bussen und in der Lade-Infrastruktur verändern sich die Aufgaben und Gefährdungen. Die Ausbildungsinhalte müssen bedarfsgerecht in Abhängigkeit der Aufgabenstellungen an das Personal differenziert sein. Vor allem im Hinblick auf die Sicherheit ist hier die Qualität der Ausbildung aller beteiligten Personen (Fahr-, Instandhaltungs- und Reinigungspersonal etc.) zu gewährleisten. Eine Standardisierung der Aus- und Weiterbildung, in Anlehnung an z.B. die deutsche BGI 8686 ist als sinnvoll zu erachten. Daraus ergibt sich ein Personal-Stufensystem, das in Abb. 6-20 dargestellt ist. Dies erfordert ggf. eine Neuausrichtung der Personalqualifikation und impliziert Zusatzkosten, die i.d.R. den Industriepartnern beim Umstieg auf die Elektromobilität auferlegt werden sollten.

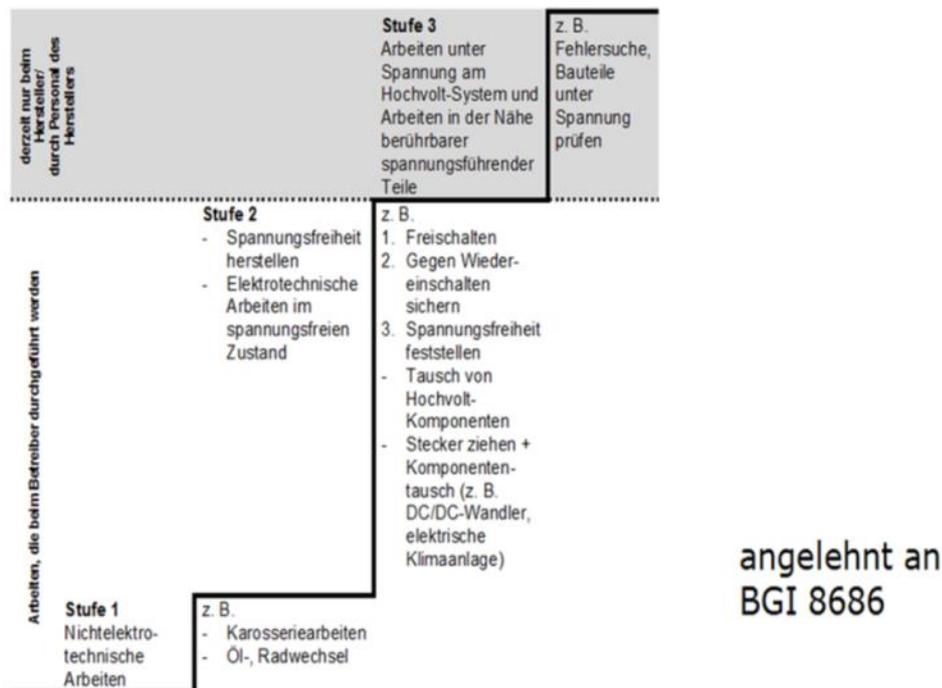


Abb. 5-15: Stufensystem für die Personalqualifikation bei Elektroantrieben nach BGI 8686

5.5 Ergebnisse der Ökonomie-Bilanzen

5.5.1 Ökonomischer Vergleich 2018 ("heute")

Die ökonomische Gesamtbewertung der reinen **Fahrzeugkosten** (ohne Infrastruktur) für den Zeithorizont 2018 (heute) bei einer SWG-üblichen Abschreibungsdauer von

10 Jahren ist in den Abbildungen 5-16 und 5-17 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass heute alle Elektrobustechnologien – trotz der angesetzten Förderung von 80 Prozent der Mehrkosten gegenüber einem Dieselbus – noch hochsignifikant teurer als konventionelle, hochsaubere Euro-VI-Antriebe sind.

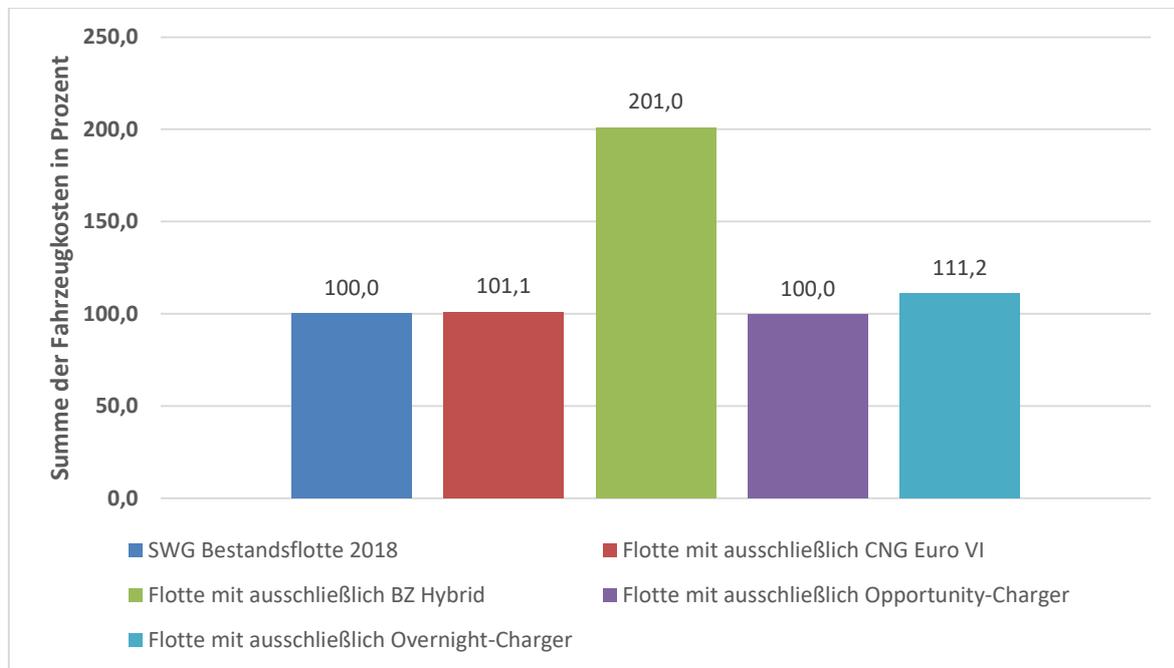


Abbildung 5-16: Relativer Kostenvergleich der Antriebstechnologien für die SWG-Flotte (Lebenszykluskosten ohne Fahrerkosten) auf der Basis jährlicher Fahrzeugkosten für den Zeithorizont „heute“ – ohne Förderung (außer für E-Mobilität) und ohne Infrastruktur

Bei einseitiger Förderung der Optionen der Elektromobilität könnte – ohne Berücksichtigung der Energiezuführungsinfrastruktur – ein Opportunity-Charger de facto ohne Mehrkosten gegenüber der Bestandsflotte bzw. einer Euro-VI-Erdgasbusflotte beschafft werden. Alle anderen Optionen der Elektromobilität liegen dennoch weit jenseits dieser Mehrkosten. Die detaillierten Kosten sind in Abbildung 5-17 dokumentiert. Zum Brennstoffzellen-Hybridbus ist anzumerken, dass die heute verfügbaren Fahrzeuge noch die höchsten Kapitaldienst- und Instandhaltungsaufwendungen erfordern. Durch Reduktion der Brennstoffzellenkosten sowie durch eine zukünftig höhere Lebensdauer der Stacks werden signifikante Kostensenkungspotentiale gesehen, jedoch ist die Kostenentwicklung von Brennstoffzellenbussen weiterhin mit hohen Unsicherheiten verbunden, die wesentlich auch von der Marktdurchdringung von BZ-Fahrzeugen in anderen Märkten (z.B. Pkw) abhängt.

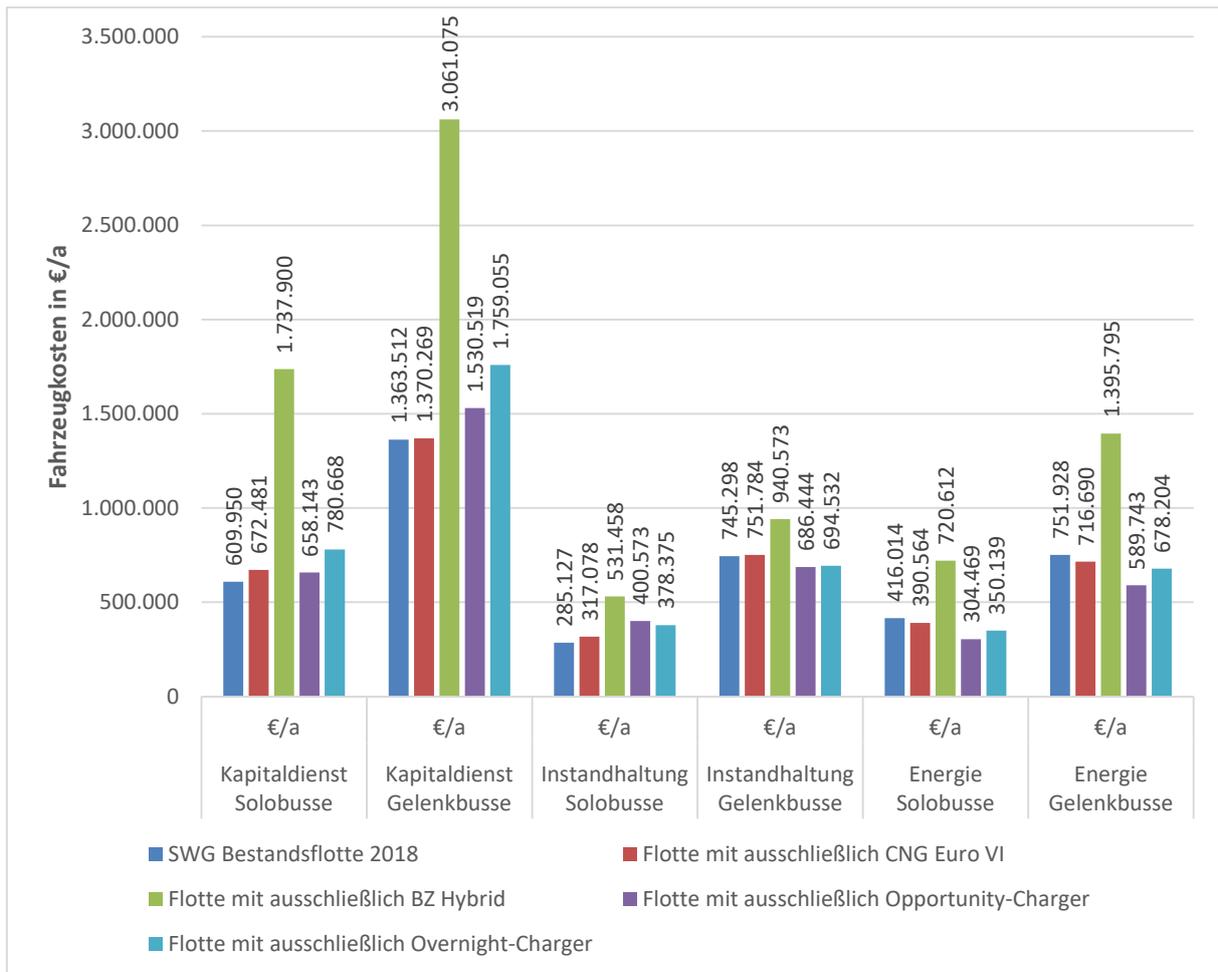


Abbildung 5-17: Absoluter, differenzierter Kostenvergleich der Antriebstechnologien für die SWG-Flotte (Lebenszykluskosten ohne Fahrerkosten) auf der Basis jährlicher Fahrzeugkosten für den Zeithorizont „heute“ – ohne Förderung (außer E-Mobilität) und ohne Infrastruktur

Zum Vergleich sollen nachfolgend die aktuellen betrieblichen Relationen ohne Förderung – und ohne Infrastruktur – dargestellt werden, also die „echten“ Fahrzeug-Marktkosten, vgl. Abbildung 5-18. Demnach erfordert die fahrzeugseitig kostengünstigste Option der Elektromobilität, Opportunity-Charger, rund 23 Prozent fahrzeugbezogene Mehrkosten gegenüber einer Euro-VI-Erdgasbusflotte. Eine Overnight Charger-Flotte würde – ohne Infrastruktur – Mehrkosten um mehr als 80 Prozent erfordern. Wirtschaftlich völlig abgeschlagen liegt heute der Brennstoffzellenhybridbus.

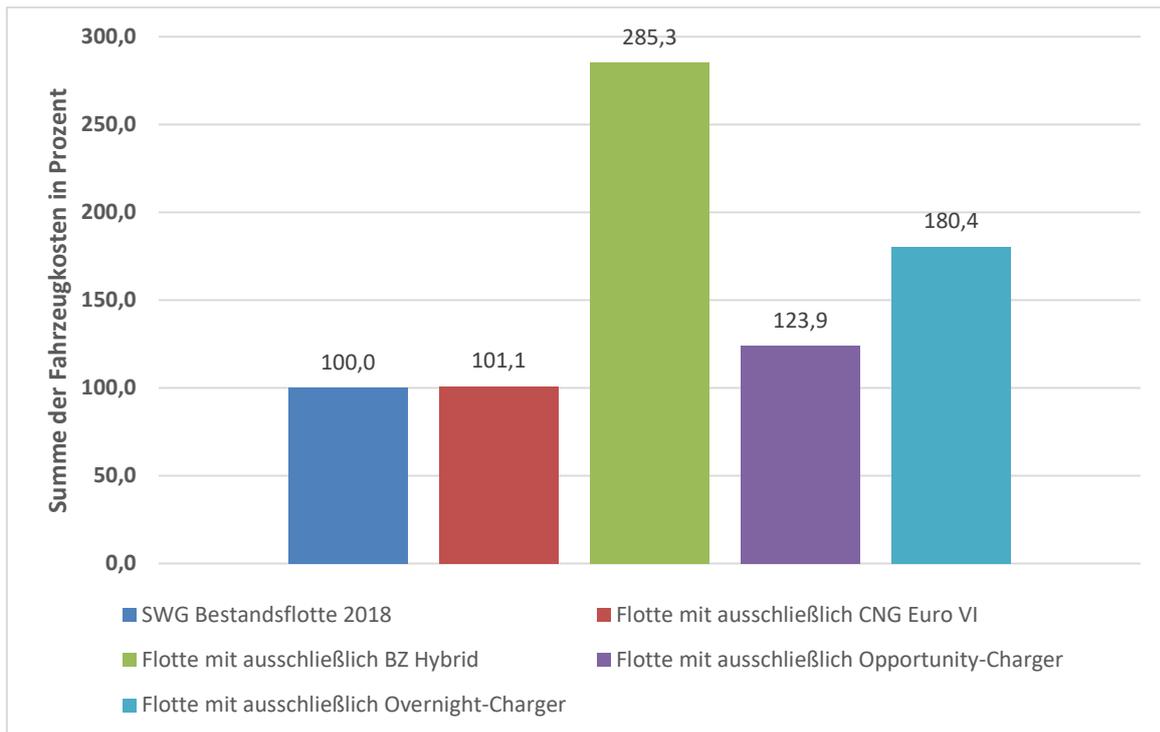


Abbildung 5-18: Relativer Kostenvergleich der Antriebstechnologien (Lebenszykluskosten ohne Fahrerkosten) auf der Basis jährlicher Fahrzeugkosten für SWG-Flotte für den Zeithorizont „heute“ – ohne Förderung und ohne Infrastruktur

Die aktuellen Kostenrelationen, inklusive geförderter Fahrzeuge und Infrastruktur des Spektrums Elektromobilität, im Vergleich zur aktuellen SWG-Flotte und zur nicht geförderten Umstellung auf eine Euro-VI-Erdgasbusflotte sind in den Abbildungen 5-19 und 5-20 aufgezeigt. Demnach fallen durch die aktuelle, großzügige Anschubfinanzierung durch das Bundesumweltministerium für die Batteriebus-Optionen lediglich Mehrkosten zwischen 12 und 15 Prozent an. Ohne die erwartete Verstärkung der spezifischen Anschubfinanzierung würden dann in den Folgejahren die in Abbildung 5-18 dokumentierten Mehrkosten für die elektrischen Antriebsoptionen von der SWG zu übernehmen sein.

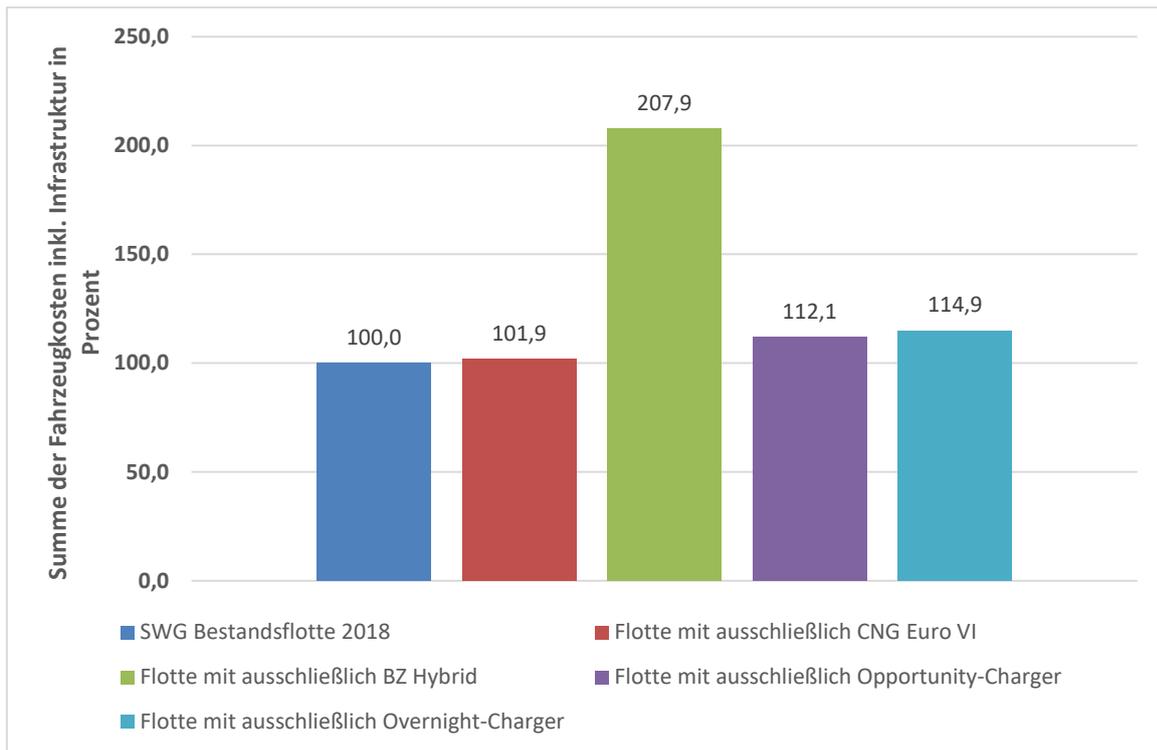


Abbildung 5-19: Relativer Kostenvergleich der Antriebstechnologien (Lebenszykluskosten ohne Fahrerkosten) auf der Basis jährlicher Fahrzeugkosten für SWG-Flotte für den Zeithorizont „heute“ – mit Förderung und mit Infrastruktur

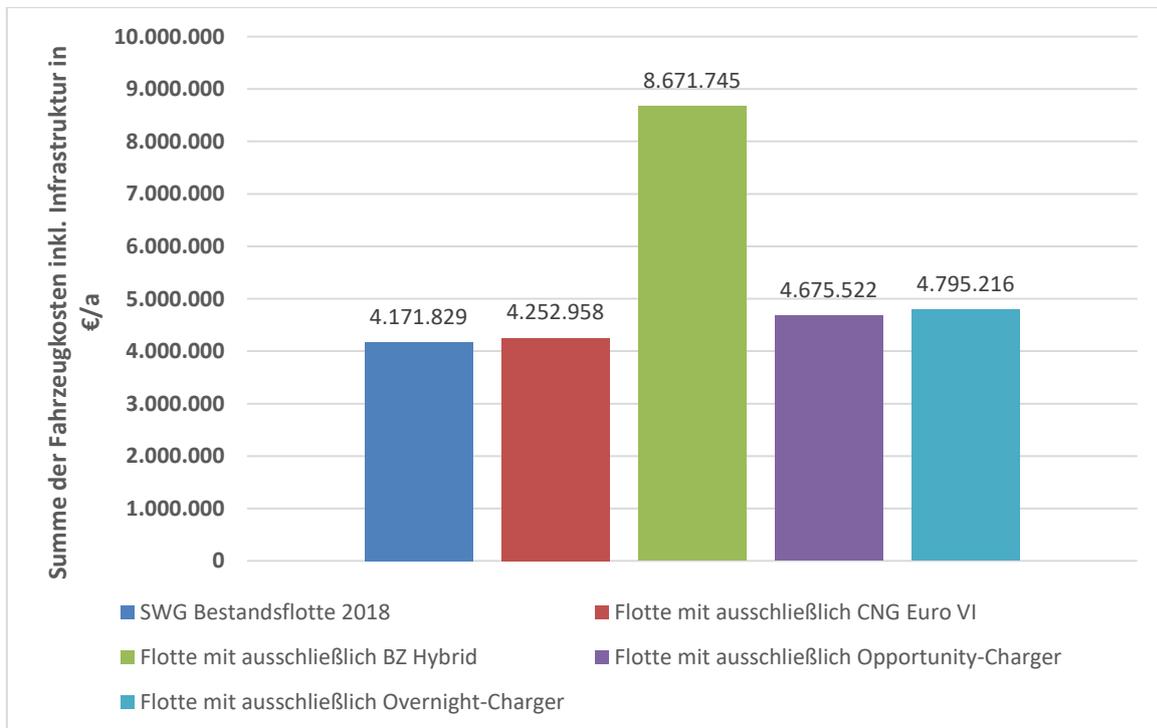


Abbildung 5-20: Absoluter Kostenvergleich der Antriebstechnologien (Lebenszykluskosten ohne Fahrerkosten) auf der Basis jährlicher Fahrzeugkosten für SWG-Flotte für den Zeithorizont „heute“ – mit Förderung und mit Infrastruktur

Auch bei einer spezifischen Fahrzeugförderung (80% der Mehrkosten gegenüber einem Dieselbus) und Infrastrukturförderung (40% der Mehrkosten) bei den Elektrobussen ist heute mit signifikanten Gesamtmehrkosten zu rechnen. Der durchschnittliche Kilometerpreis der SWG-Flotte würde bereits für die aktuell kostengünstigste Form der Elektromobilität (Opportunity Charger) trotz Förderung um knapp 0,20 € pro Kilometer im Vergleich zur bestehenden Flotte ansteigen. Demgegenüber würde der vollständige Umstieg auf eine Erdgasbusflotte mit Biogas lediglich Mehrkosten von 0,04 € pro Kilometer erfordern.

5.5.2 Ökonomischer Vergleich 2030 (“mittelfristig”)

Für die ökonomische Bewertung für den Zeithorizont 2030 (mittelfristig) wird eine Entwicklung der Kraftstoffpreise wie in Kapitel 5.2 dargelegt angenommen. In den Investkosten ist für die Elektromobilität die prophezeite, signifikante Kostendegression der Energiespeicher, jedoch weiterhin eine Ersatzbatterie über die 12-16jährige betriebliche Einsatzdauer beim (ersten) Betreiber inkludiert. Heute ist davon auszugehen, dass die Lebensdauer der Batterien beim durchschnittlichen ÖPNV-Einsatz kaum mehr als ein „halbes Busleben“ (etwa 7 Jahre) erreicht. Für die Brennstoffzellen (BZ)-Technik ist ebenfalls eine signifikante Kostendegression angenommen.

Daraus folgt die in den Abbildungen 5-21 und 5-22 dargestellte **ökonomische Gesamtbewertung** für den Zeithorizont 2030 (mittelfristig), wobei dann bei allen Antriebsoptionen **keine Förderung** mehr angesetzt wird, da auch bei den alternativen Konzepten der Elektromobilität (Batterie- und BZ-Technik) auf diesem Zeithorizont eine erreichte Serienreife unterstellt wird. Außerdem wird dann die Energiezuführungsinfrastruktur als bereits vorhanden vorausgesetzt.

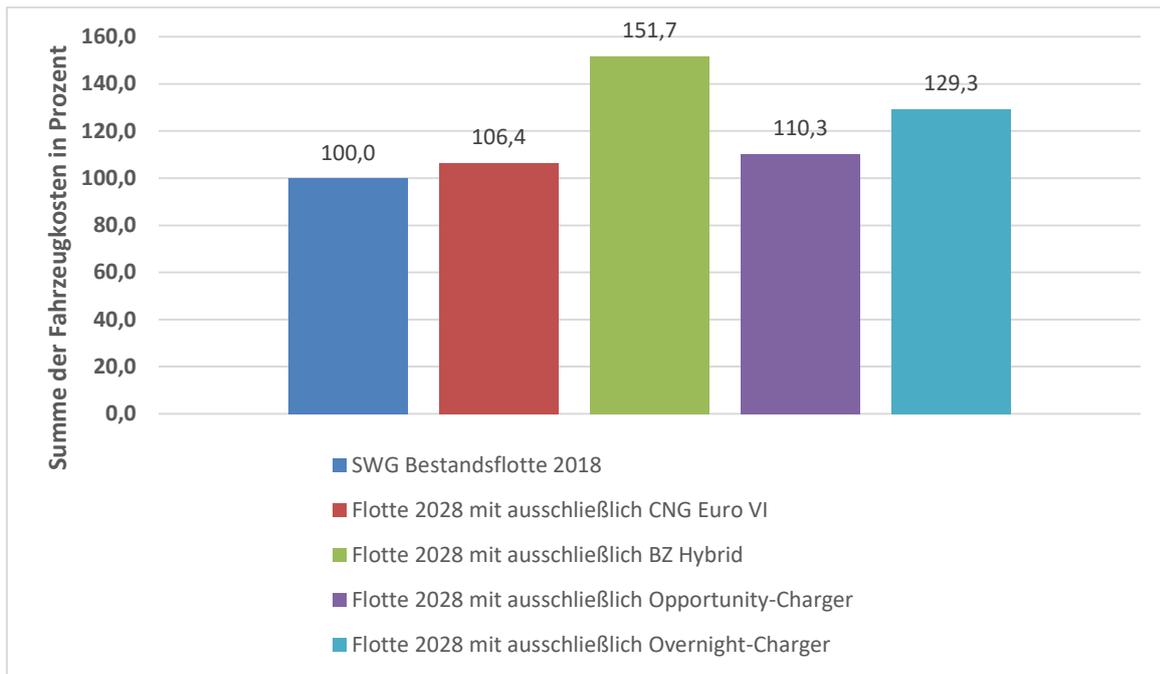


Abbildung 5-21: Kostenvergleich der Antriebstechnologien für die SWG-Flotte (Lebenszykluskosten ohne Fahrerkosten) auf der Basis jährlicher Fahrzeugkosten für den Zeithorizont „mittelfristig“– ohne Förderung und ohne Infrastruktur

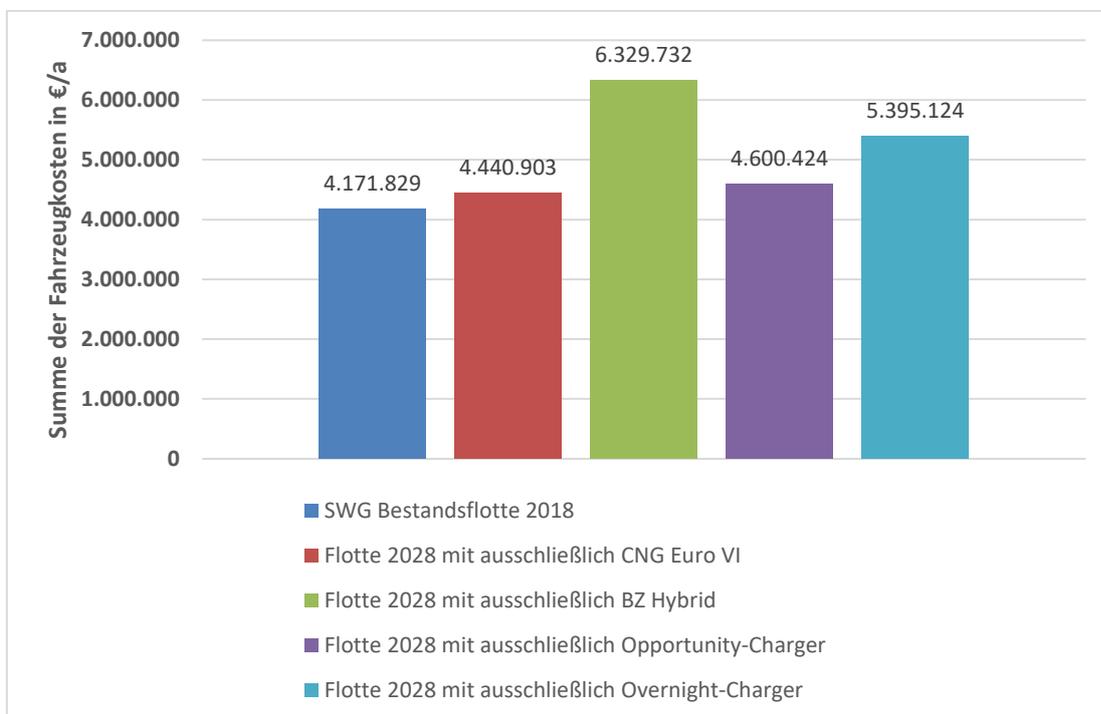


Abbildung 5-22: Relativer Kostenvergleich der Antriebstechnologien für die SWG-Flotte (Lebenszykluskosten ohne Fahrerkosten) auf der Basis jährlicher Fahrzeugkosten für den Zeithorizont „mittelfristig“– ohne Förderung und ohne Infrastruktur

Es ist ersichtlich, dass mittelfristig (Jahr 2030) Elektrobusse – insbesondere wegen der anzunehmenden Steigerung der Energiepreise für die fossilen Kraftstoffe Diesel und Erdgas sowie der Reduktion der Batterie- und BZ-Kosten und trotz steigender Strompreise – sich wirtschaftlich an die konventionellen Antriebe annähern werden. Die Wirtschaftlichkeit der etablierten, hochsauberen Konzepte mit Verbrennungsmotor wird jedoch auch mittelfristig von den Optionen der Elektromobilität für die Gegebenheiten der SWG nicht erreicht werden. Mit der mittelfristig noch dominierenden, heutigen Lithium-Ionen-Batterietechnik wird ein Betrieb von Elektrobussen wie bei Bussen mit Verbrennungsmotor – also Overnight Charger (GL) – aufgrund der hohen Investitionskosten bereits **ohne Berücksichtigung der Investitionen in die Infrastruktur** nur mit **hochsignifikanten Mehrkosten** von rund 30% gegenüber heute möglich sein. Der Opportunity Charger (GL) wird – ohne Berücksichtigung der Infrastrukturkosten noch um mehr als 10% Mehrkosten aufweisen. Die mittelfristig wirtschaftlichste Option wird der Betrieb mit Erdgasbussen (Biogas) bleiben.

Zu einer qualitativ äquivalenten Bewertung kommt auch das Haus McKinsey, 2011 in seiner doch recht allgemein gehaltenen Studie, an der jedoch alle Stakeholder beteiligt waren (siehe Abb. 5-23). Hierin wird ebenfalls prognostiziert, dass im Jahr 2030 die konventionellen Antriebe mit Verbrennungsmotor weiterhin hochsignifikante Kostenvorteile gegenüber den Optionen der Elektromobilität haben werden. Die Studie prophezeit ebenfalls der Erdgastechnik (CNG) für 2030 die größte Wirtschaftlichkeit.

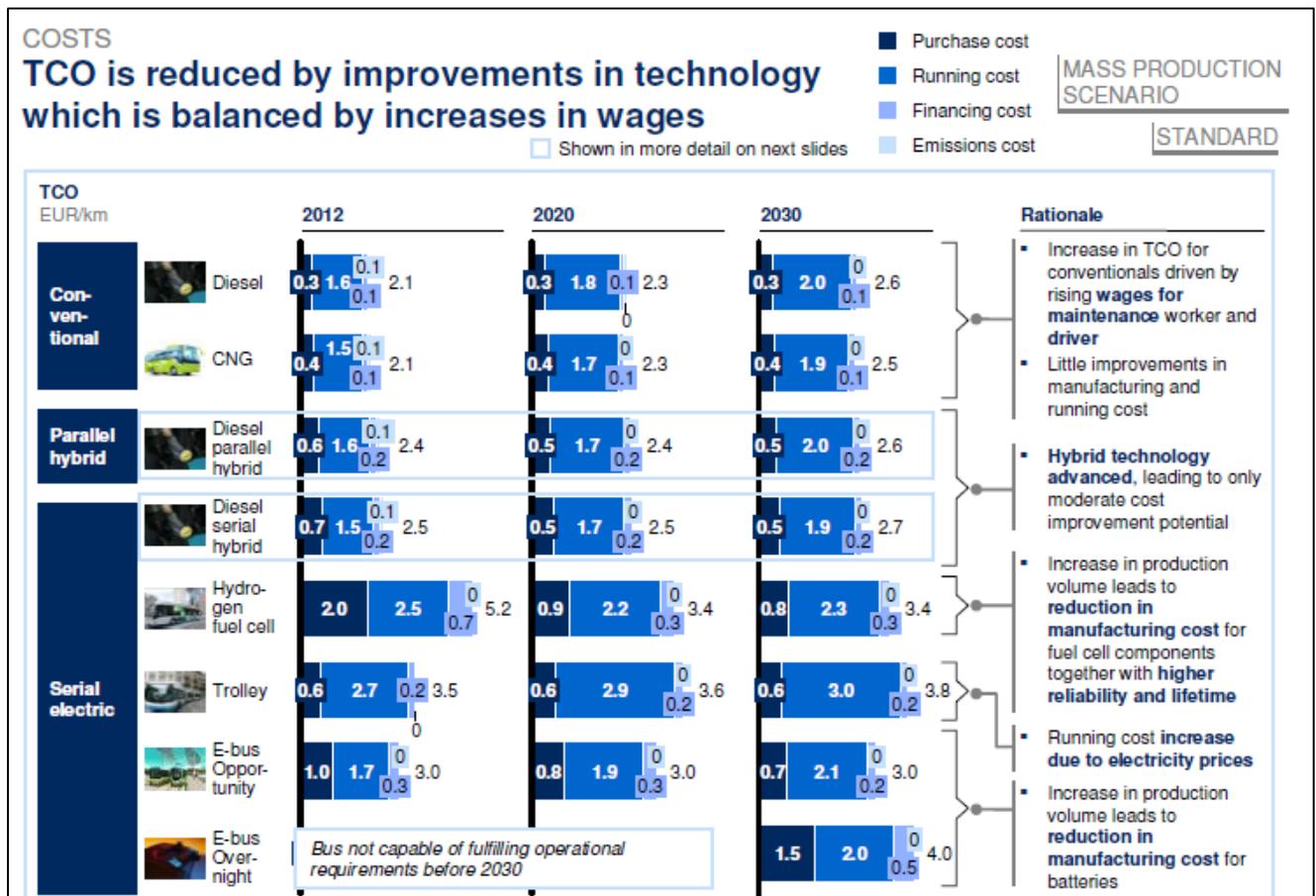


Abbildung 5-23: Allgemeiner Kostenvergleich der Antriebstechnologien (Lebenszykluskosten) auf verschiedenen Zeithorizonten (Quelle: Mc Kinsey, 2011)

Da die Weiterentwicklung der Elektromobilität im Pkw-Bereich als Treiber auch für die Kostendegression der Elektromobilität bei Linienbussen angesehen wird, soll hier die Bewertung FEV Aachen (2017) für den Zeitverlauf bis zum Jahr 2030 angeführt werden, siehe Abbildung 5-24. Demnach werden im Jahr 2030 lediglich 20% der Neuzugänge im Bereich Pkw und leichte Nutzfahrzeuge nicht über einen Verbrennungsmotor verfügen. Batteriefahrzeuge werden dann 19% und Brennstoffzellenfahrzeuge lediglich 1% der Fahrzeugneuzugänge ausmachen. Allerdings sollen 91% der Neuzugänge über einen elektrischen Antriebsstrang verfügen, was die zunehmende Bedeutung der (Plug-in) Hybridisierung belegt. Den mit 51% größten Anteil an den Neuzugängen werden den Mild-Hybriden zugeschrieben.

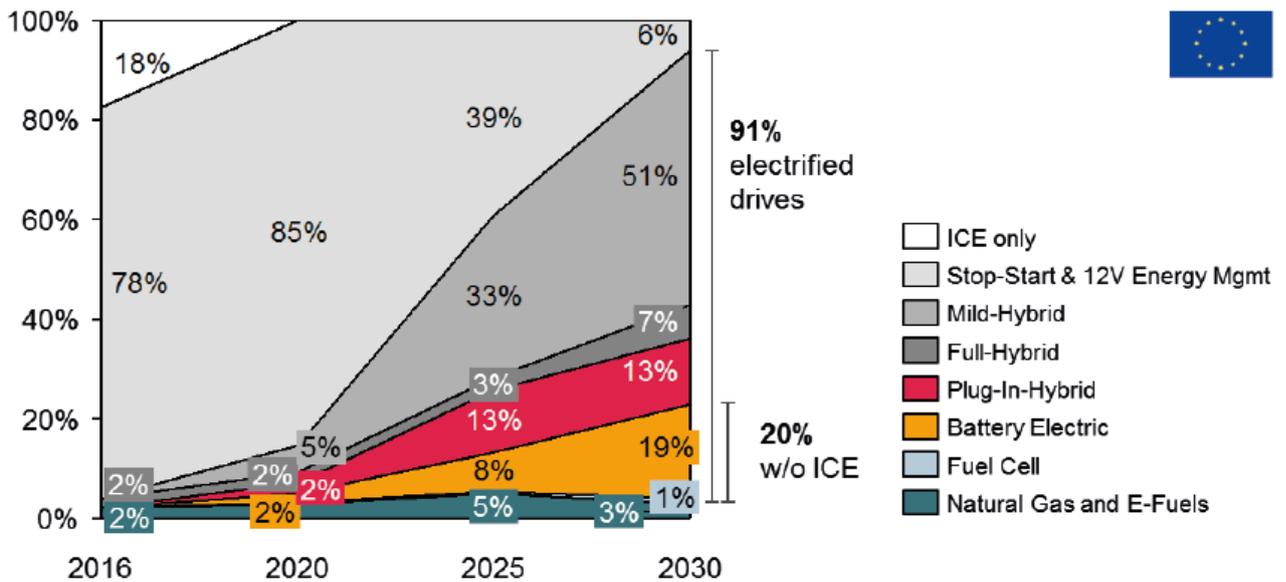


Abbildung 5-24: Entwicklung der Antriebstechnologien: Neuzugänge im Bereich Pkw und leichte Nfz bis 2030 (Quelle: FEV, 2017)

Trost (2016) entwickelte in seiner Dissertation am Fraunhofer IWES eine Prognose für die Entwicklung des Fahrzeugbestandes je Antriebstechnik im Zeitverlauf, siehe Abbildung 5-25. Er prognostiziert für das Jahr 2030 einen Anteil an Batteriefahrzeugen um rund 7%. Erst nach 2040, mit der erwarteten Einführung der Post-Li-Ionen-Technik (Li-Luft, Li-S, Festkörperbatterien...) wird die Batterieelektromobilität an Bedeutung gewinnen.

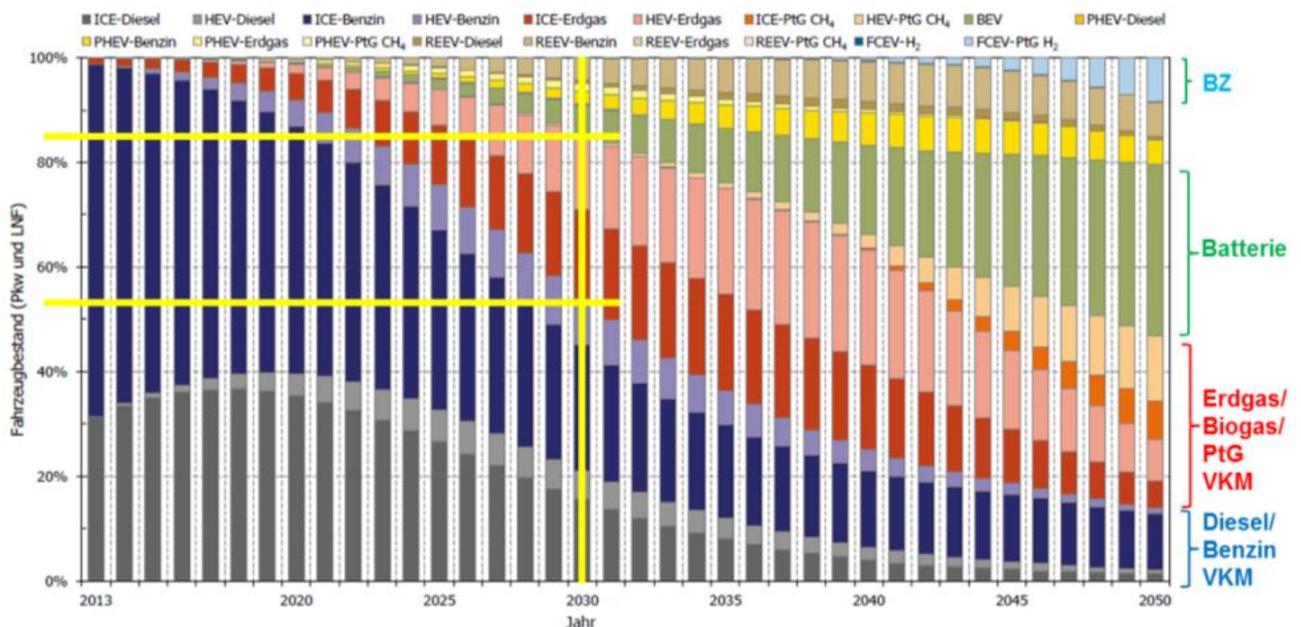


Abbildung 5-25: Entwicklung der Fahrzeugbestände nach Antriebstechnologien bis 2030 (Quelle: Trost, Diss. 2016)

6 Schlussfolgerungen zum Vergleich konventioneller und alternativer Antriebe für die Technologieausrichtung der SWG

Die ökologische und ökonomische Analyse der zurzeit eingesetzten oder im Test befindlichen alternativen Antriebstechnologien für Linienbusse und deren erwartete Weiterentwicklung hat gezeigt, dass konventionelle „Near Zero Emission“-Antriebe mit CNG-Verbrennungsmotoren für die überschaubare Zukunft, d.h. den Betrachtungshorizont „mittelfristig“, für die Bedingungen der SWG weiterhin die erste Wahl für Linienbusse bleiben werden, denn sie ermöglichen es weiterhin sowohl wirtschaftlich als auch umweltgerecht zu handeln. Alternative Antriebe des Spektrums Elektromobilität würden im Vergleich zu der etablierten CNG-Verbrennungsmotor-Option heute (2018) systembezogen die Ökobilanz nicht verbessern. Erst mittelfristig (2030) können die alternativen Optionen der Elektromobilität das ökologische Niveau der etablierten Antriebsoption mit CNG-Verbrennungsmotor und fossilem Erdgas für die Randbedingungen der SWG unterbieten. Unangefochten die **ökologisch günstigste Option bleibt auch mittelfristig die Erdgasbustechnik mit Biogas aus Abfällen**.

Ökonomisch betrachtet liegen alle alternativen Antriebe des Spektrums Elektromobilität heute (2018) – trotz der Förderung von 80 Prozent der Fahrzeugmehrkosten gegenüber einer Euro-VI-Erdgasbusflotte und trotz der Förderung von 40 Prozent der Anschaffungskosten für die Energiezuführungsinfrastruktur – weitab jenseits eines wirtschaftlichen Einsatzes. So wäre **heute** inklusive der aktuellen Fahrzeug- und Infrastrukturförderung des Bundes **mit jährlichen Mehrkosten (inklusive Infrastruktur)** in der Größenordnung **von rund 12 Prozent beim Opportunity Charger (Gelegenheitslader) und 15 Prozent beim Overnight Charger** zu rechnen. Weit abgeschlagen liegt heute der Brennstoffzellen-Hybridbus mit rund 108 Prozent Mehrkosten als teuerste Option. Etwaige Mehrkosten aufgrund noch geringerer Verfügbarkeit oder reduzierter Fahrgastkapazität (Overnight-Charger) wurden dabei nicht berücksichtigt.

Auch **mittelfristig** (2030) werden die Mehrkosten der Optionen des Spektrums Elektromobilität – bei dann nicht mehr unterstellter spezifischer Förderung – noch nicht das Niveau der hochsauberen Verbrennungsmotoroptionen erreicht haben und bei Be-

rücksichtigung der Energiezuführungsinfrastruktur (dann ohne Förderung) im Abschreibungszeitraum **noch Mehrkosten zwischen rund 10 Prozent (Opportunity Charger) und 29 Prozent (Overnight Charger)** gegenüber der aktuellen SWG-Flotte erfordern. Die Mehrkosten für Brennstoffzellenhybride werden dann immer noch abgeschlagen bei rund 52 Prozent liegen. Für alle Antriebsoptionen wurde auf dem Zeithorizont „mittelfristig“ das Vorhandensein einer entsprechenden Infrastruktur für die Energiezuführung vorausgesetzt. Aufgrund der rasanten Entwicklung der Elektromobilität wird jedoch ausdrücklich empfohlen, eine Neubewertung nach etwa fünf Jahren durchzuführen, um Einflüsse evtl. neuer Batterietechnologien, die aus heutiger Sicht zu diesem Zeitpunkt nicht als betrieblich serienreif absehbar sind, zu berücksichtigen.

Um das vorhandene Potenzial alternativer (elektromobiler) Busantriebe vollumfänglich zu entwickeln ist es wichtig, dass einige – **große** – Verkehrsunternehmen dazu bereit sind, solche Busse im Linienverkehrseinsatz zu testen und so wertvolle Erfahrungen zu sammeln, die allen Verkehrsunternehmen und damit der gesamten ÖPNV-Branche dienen. Kleinere und mittlere Verkehrsunternehmen sind von dieser Pionierrolle indes i.d.R. massiv überfordert, da eine kritische Größe von etwa 200 Linienbussen oder Synergien durch das Vorhandensein einer Straßenbahn/Stadtbahn vorhanden sein sollten bzw. müssen. Die Erprobung alternativer Antriebe des Spektrums Elektromobilität ist darüber hinaus auch nur dann möglich, wenn **kontinuierlich** umfangreiche Mittel der öffentlichen Hand **über lange Zeit** hierfür zur Verfügung gestellt werden oder die jeweilige Kommune hier äquivalent unterstützt.

Trotz der objektiven Fakten zu den tatsächlichen ökonomisch-ökologischen Realitäten der unterschiedlichen Antriebsoptionen heute und mittelfristig, die in dieser Studie auf der Basis der Randbedingungen der SWG erhoben wurden, ist allgemein ein massiver politischer Druck auf die Verkehrsunternehmen zu erkennen, eine Elektromobilität im ÖPNV zu etablieren. Deshalb wählen aktuell viele Verkehrsunternehmen, die der Autor mit seinem Institut berät, den pragmatischen Weg, aufgrund der aktuell massiven Förderung zunächst einige wenige Elektrobusse sowie die Energiezuführungsinfrastruktur zu beschaffen, so lange die Förderanreize bestehen, um einerseits den Anforderungen der Politik Genüge zu tun und andererseits trotz der noch hochsignifikant reduzierten Verfügbarkeit und Einschränkungen des Systems „Elektromobilität“ (Elektrobusse und Ladungsinfrastruktur) dann mit den vorhandenen konventionellen Bussen mit Verbrennungsmotor den Betriebsablauf sicherzustellen.

7 Literaturverzeichnis

- Achilles, L. (2008): Verkehrsgeschichte(n) vom Hamburger Nahverkehr.
- AG Energiebilanzen (2015): Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern.
- F. Bergk, U. Lambrecht und R. Pütz, Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses zur Nutzung regenerativer Energien und Steigerung der Energieeffizienz, Heidelberg, IFEU/BELICON, 2015
- F. Bergk, U. Lambrecht, R. Pütz und H. Landinger, *Analyse der Lebenszykluskosten von Hybrid-Oberleitungsbussen*, Heidelberg, IFEU/BELICON, 2015
- Björklund, S. / Soop, C. / Rosenqvist, K. / Ydstedt, A. (2000): New Concepts for Trolley Buses in Sweden. Malmö, Sweden.
- 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.
- 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 – Energiereferenzprognose.
- FH ISI (2013): Markthochlaufszzenarien 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. Pehnt. 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“ (TREM-OD) 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.
- 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): Renewability: 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.
- Öko-Institut / Agora-Verkehrswende (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Berlin
- Prognos (2010): Studie Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung.
- Pütz, R. (2016), On-Road-Emissionsvermessung (PEMS) von Euro-VI-Gelenkornibussen in Gießen: Vergleich der Realemissionen eines CNG- und eines Diesel-Gelenkbusses des Herstellers MAN im Linienbetrieb auf den repräsentativen Gießener Stadtbuslinien 801 und 1 (**Bericht Nr. BELICON/SWG-1-21.08.2016**)
- Pütz, R. (2010): Strategische Optimierung von Linienbusflotten Köln: Alba Fachverlag, 2010.
- Pütz, R., Einführung in die Linienbustechnik, Köln: Alba Fachverlag, 2012.
- Pütz, R., Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses zur breiteren Einführung der Elektromobilität im ÖPNV mit Linienbussen- Ökonomische Analyse unter LCC-

Aspekten, Berlin, 2016

- Quian, J. / Wang, J. (2006): World oil shale retorting technologies.
- 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.
- 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.
- Schulz, A., Batterieelektrische Fahrzeuge im gewerblichen Flottenbetrieb, Berlin, Dissertation, 2015
- Schweizer, F. (2006): Plädoyer für den Trolleybus. In: *Üsi Meinig, Mitteilungsblatt des VCS und WWF Schaffhausen*. Vol. 1, pp. 14–17.
- Spousta, J. / Németh, Z. Á. / Wolek, M. / Weiß, A. / Chick, D. G. (2013): Trolleybus Intermodal Compendium.
- Stadtbus Winterthur (2013): Der Trolleybus fährt seit 75 Jahren. Eine Erfolgsgeschichte. In: *Stadtbus Aktuell*. Winterthur.
- SVE (2015): Geschichte der Städtischen Verkehrsbetriebe Esslingen: 1950-1959. SVE (Städtische Verkehrsbetriebe Esslingen). <http://www.sves.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): 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 (2017): Busförderung in den Ländern Stand : Juni 2017.
- Verbio (2016/17): Jahresbericht.
- 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. Präsentation im Rahmen des Fachworkshops Hybrid-Oberleitungsbusse – Ein Beitrag zur Gestaltung der Energiewende im Verkehrssektor oder Techniknostalgie? Berlin, 11. März 2015.