

Analyse der Lebenszykluskosten von Hybrid-Oberleitungsbussen

Fabian Bergk, Udo Lambrecht, ifeu
Prof. Dr. Ralph Pütz, belicon
Hubert Landinger, LBST

In diesem Fokuspapier werden Einsatzbereiche des Hybrid-Oberleitungsbusses (HO-Bus) hinsichtlich ihrer Kosten analysiert und mit den Kosten anderer Elektrobustechologien und von Dieselnissen verglichen. Bezugsgröße des Vergleiches ist die Beförderungskapazität (Passagiere je Stunde und Richtung bzw. Platz-km). Die Fahrzeugkosten der Technologien werden dabei auf Basis der Kosten der Einzelkomponenten abgeleitet, um eine bessere Vergleichbarkeit sowie eine Projektion der Kostenentwicklung zu erhalten. Dabei bleibt der Dieselniss bis 2025 die kostengünstigste Technologie, Elektrobusse können jedoch mittelfristig konkurrenzfähig werden. Die Kosten der Elektrobustechologien gleichen sich an, Technologien ohne streckenseitiger Infrastruktur (Brennstoffzellenbus, Nachtlader) bleiben kostenintensiver als der HO-Bus oder der Gelegenheitslader. Ist eine hohe Beförderungskapazität gefordert (ab ca. 6 min Takt, 18 m-Bus), ist der HO-Bus heute die kostengünstigste Elektrobustechologie. Bei Gelegenheitsladern können zudem durch Ladezeiten Produktivitätseinschränkungen entstehen, die zu einer deutliche geringeren Wirtschaftlichkeit führen. Durch Fortschritte in der Batterietechnologie (Kosten, Energiedichte) kann sich die Kostenstruktur des Gelegenheitsladers gegenüber dem HO-Bus jedoch bis 2025 deutlich verbessern – tendenziell bleibt der HO-Bus aber weiterhin die kostengünstigste Elektrobustechologie bei hohen bis sehr hohen Beförderungskapazitäten.

Synthese und Vergleich „Lebenszykluskosten alternativer Antriebstechnologien von Gelenkbussen“

In diesem Papier werden Kosten von derzeit diskutierten Elektrobuskonzepten mit denen eines Dieselnisses (Referenz) verglichen. Insbesondere wird dabei der Fragestellung nachgegangen, für welche Einsatzbereiche der Hybrid-Oberleitungsbuss (HO-Bus) die Chancen für einen wirtschaftlichen Betrieb hat. Der Vergleich fokussiert dabei auf Gelenkbusse (18 m), da diese einerseits einen hohen Anteil der Beförderungseistung im städtischen Busbetrieb erbringen, andererseits insbesondere auf nachfragestarken Linien eingesetzt werden, für die der HO-Bus besonders geeignet erscheint. Folgende Konzepte werden verglichen:

- Hybrid-Oberleitungsbuss (HO-Bus)
- Gelegenheitslader/ Opportunity Charger (GL)
- Nachtlader/ Overnight Charger (NL)
- Brennstoffzellen-Bus (BZ)
- Dieselniss

In Abgrenzung zu einem Oberleitungsbuss mit elektrischem Hilfsantrieb ist die Batterie bei einem HO-Bus so dimensioniert, dass deren Kapazität ausreicht um relevante Betriebsanteile oberleitungsfrei erbringen zu können.

Die **Kosten je Bus-Kilometer** der verschiedenen Buskonzepte setzen sich dabei zusammen aus den auf die Fahrleistung umgelegten Kosten für:

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

Die angenommenen **Fahrzeugkosten** werden aus den Kosten der verwendeten Komponenten ermittelt. Dieser Ansatz besitzt gegenüber der Verwendung von Marktpreisen (die in 2015 etwa 100.000 bis 200.000 € über den abgeleiteten Kostensätzen liegen) den Vorteil, dass die abgeleiteten Kosten unabhängig von der aktuellen Marktsituation sind, sowie das über die Projektion von Kostenminderungen bei den Komponenten begründete Abschätzung zu zukünftigen Fahrzeugkosten möglich sind. Dabei werden die in Tabelle 1 dargestellten Fahrzeugkonfigurationen verwendet.

Tabelle 1: Technische Angaben zu den Antriebskonzepten, Gelenkbus, 18 m

		<i>HO</i>	<i>GL</i>	<i>NL</i>	<i>BZ</i>
Batteriekapazität	kWh	70	150	400	30
Leistung (Motor, Leistungselektronik) kW		250	250	250	250
Ladeleistung (im Mittel)	kW		250	60	
Brennstoffzelle	kW				160
Wasserstoffspeicher	kg				35

Es werden die Kosten der Elektrobusse sowohl basierend auf automotiver Elektrotechnik (Elektromotoren, Leistungselektronik) mit einer 12-jährigen Lebensdauer – als auch als Sensitivität die Verwendung von kosten-intensiverer, aber langlebiger (20 Jahre Lebensdauer) Bahntechnik berechnet.

Tabelle 2: Investitionskosten Fahrzeuge nach Antriebskonzept, Gelenkbus, 18 m, 2015 und 2025

Antriebskonzept	Elektrotechnik	2015	2025
Hybrid-Oberleitung	Automotive	500.000 €	427.885€
	Bahn	562.500 €	490.385 €
Gelegenheitslader	Automotive	535.000 €	437.610 €
	Bahn	597.500 €	500.110 €
Übernachtlander	Automotive	785.000 €	608.627 €
	Bahn	847.500 €	671.127 €
Brennstoffzelle	Automotive	600.760 €	463.242 €
	Bahn	663.260 €	525.742 €
Diesel		350.000 €	350.000 €

Infrastrukturkosten des HO-Buses sind deutlich höher als bei den anderen Buskonzepten. Während die Infrastrukturkosten beim HO-Bus als weitgehend unabhängig von der Taktfrequenz angenommen werden können, nehmen Energie -, Personal- und Buskosten nahezu linear zu. Abbildung 1 zeigt dies in 2015 für eine Linie von 15 km Länge, SORT 2-Zyklus. Die Annahmen zu den Infrastruktur- (Tabelle 8) und Energiekosten (Tabelle 4) sind in im Kapitel „Annahmen der Kostenrechnung“ dargestellt.

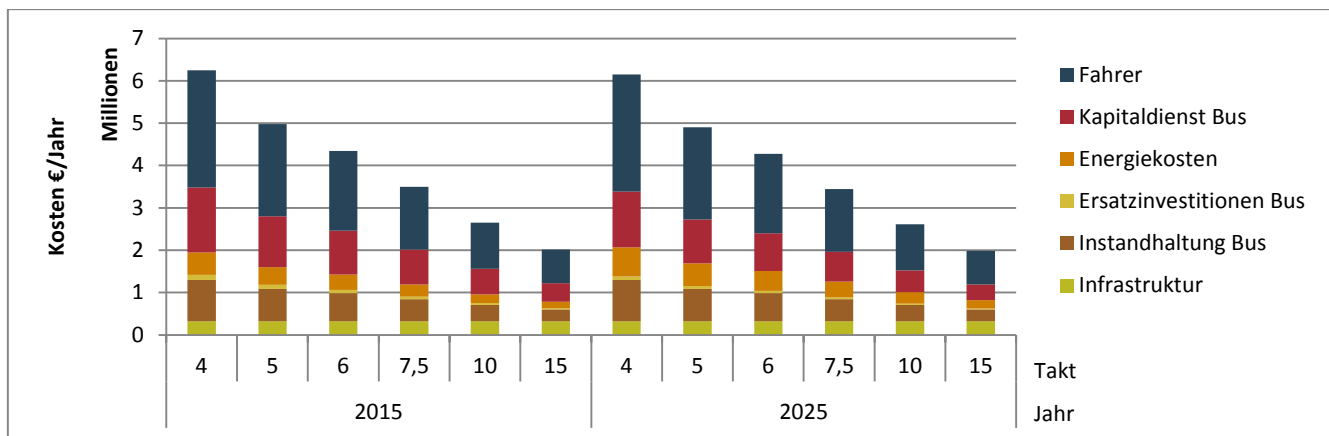


Abbildung 1: Jährliche Kosten Hybrid-Oberleitungsbus-Linie, Gelenkbusse, 18 m

Mit einer Erhöhung der Taktfrequenz von 10 auf 5 Minuten sinken damit die spezifischen Infrastrukturkosten um 24 ct/Bus-km. Der HO-Bus besitzt damit einen deutlichen Skaleneffekt hinsichtlich des angebotenen Taktes. Für den Kostenvergleich mit den weiteren Antriebstechnologien in Abbildung 2 wird eine Taktfrequenz von 7,5 Minuten angenommen.

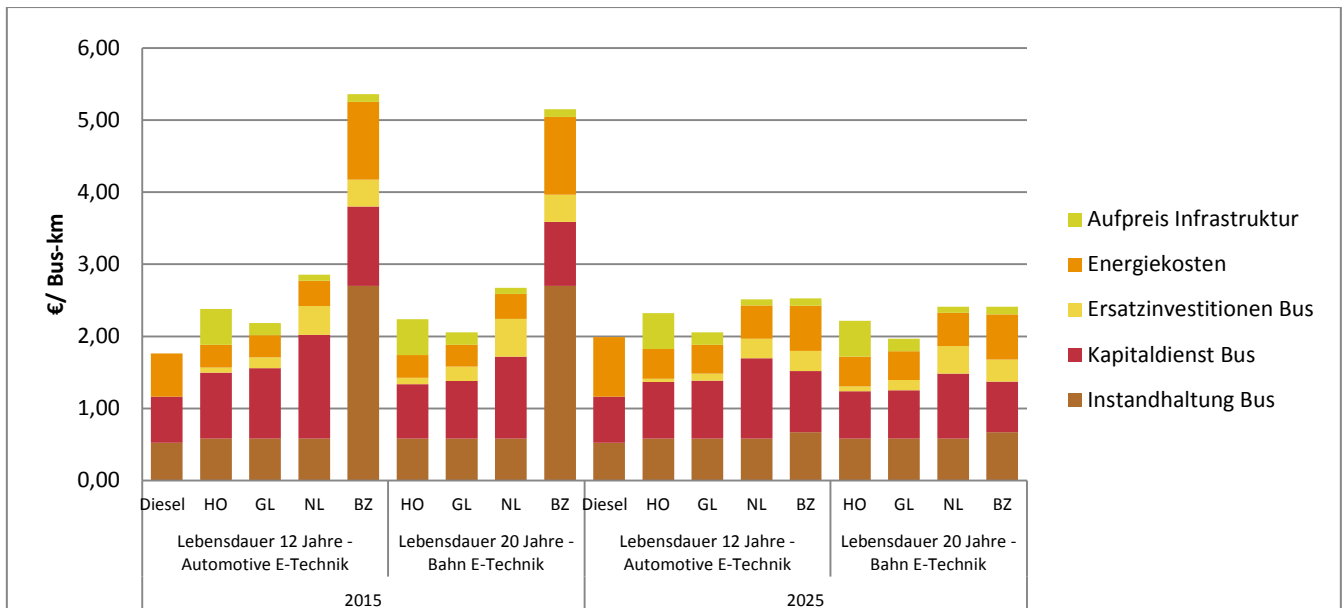


Abbildung 2: Kostenvergleich Antriebstechnologien von Gelenkbussen, 18 m (Lebenszykluskosten ohne Fahrerkosten), Takt 7,5 min (Anwendungsfall Eberswalde)

Anmerkungen und erste Folgerungen zu Abbildung 2:

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

Während auf nachfrageschwachen Linien die Bedienfrequenz ein wesentliches Qualitätsmerkmal darstellt, ist auf nachfragestarken Linien die **angebotene Beförderungskapazität (Passagiere je Stunde und Richtung)** entscheidend. Diese wird, neben dem gefahrenen Takt, durch die Beförderungskapazität je Fahrzeug bestimmt. Dabei werden durch das Gewicht der Batterien die maximalen Beförderungskapazitäten der Elektrobusse gegenüber Dieseln bussen eingeschränkt (siehe Tabelle 3). Demgegenüber besteht bei den 18m-Elektrobussen die Möglichkeit, mittels einer **zweiten angetriebenen Achse** das zulässige Gesamtgewicht von 28 Tonnen auf 30 Tonnen zu erhöhen, wie es beispielsweise von der Hess AG angeboten wird.¹

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

Tabelle 3: Beförderungskapazität je Gelenkbus (18 m) in 2015, 2025, nach Antriebstechnologien

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

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

In Abbildung 3 sind die Linienkosten bezogen auf die angebotene Beförderungskapazität und den Takt dargestellt. Ein niedrigerer Wert drückt damit eine höhere Kosteneffizienz einer Technologie bezogen auf die Beförderungskapazität aus. Damit der NL eine vergleichbare Passagierkapazität erreichen kann, ist für den Vergleich eine Konfiguration mit zwei angetriebenen Achsen gewählt.

¹ Für die zweite angetriebene Achse wird ein erhöhtes Leergewicht des Fahrzeuges um 250 kg sowie Mehrkosten von 20.000 € angenommen.

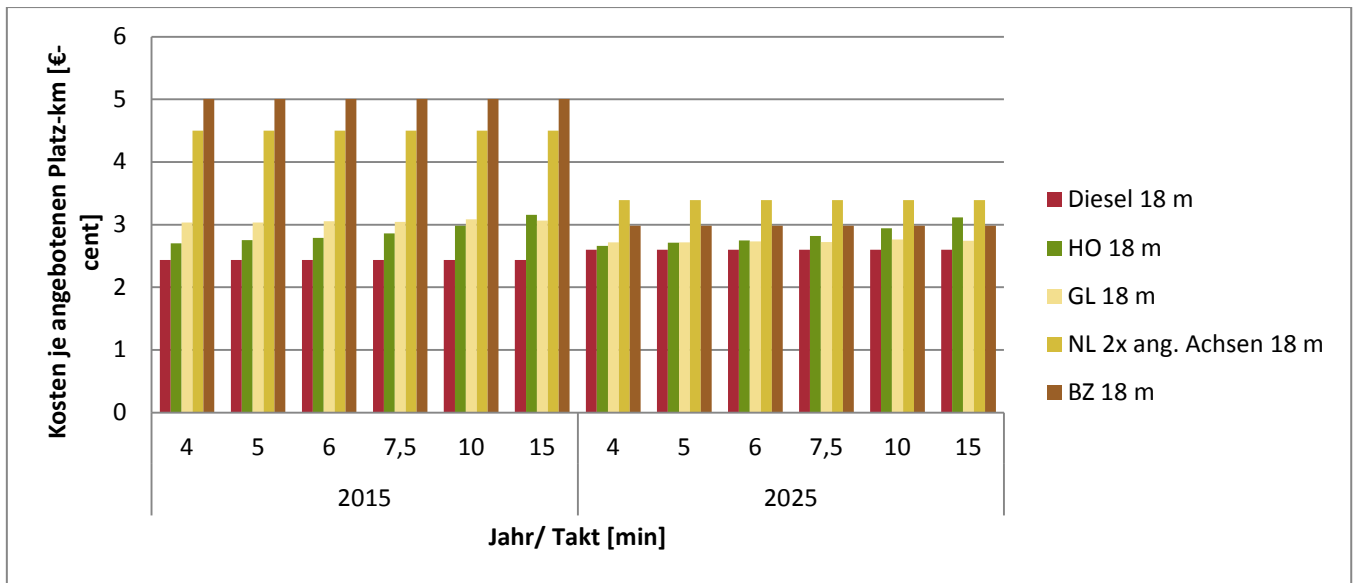


Abbildung 3: Kosten je angebotenen Platz-km [€/cent] nach Antriebssystem inkl. Fahrerkosten - Gelenkbusse (18 m), 12 Jahre Fahrzeuglebensdauer, jährliche Bus-km: 60.000

Anmerkungen und erste Folgerungen zu den Abbildungen 3:

- Insbesondere durch die hohen Kosten für Fahrer (1,65 €/km) senkt eine reduzierte Platzkapazität (und damit der Einsatz von mehr Bussen bei gleicher angebotenen Kapazität) die Wirtschaftlichkeit je Beförderungskapazität deutlich. Dies betrifft insbesondere den NL, aber im reduzierten Maße auch den GL (bei einer angetriebenen Achse).
- Bei niedrigen Beförderungskapazitäten liegen der HO-Bus und der GL in 2015 auf einem Kostenniveau. Bei hohen Beförderungskapazitäten (ab etwa 1.000 Passagiere je Stunde und Richtung) – und damit hoher Auslastung der Infrastruktur – ist der HO-Bus in 2015 der kostengünstigste Elektrobus innerhalb des betrachteten Kapazitätsbereiches.
- Die durch die steigende Energiedichte der Batterien ausgelöste erhöhte Platzkapazität des GL in 2025 führt, zusammen mit der Kostensenkung der Fahrzeuge, zu einer deutlichen Steigerung der Wirtschaftlichkeit dieser.
- Die Entwicklung bei den GL führt zu einer weiteren Annäherung der Kosten zwischen dem HO-Bus und dem GL, bei steigender Unsicherheit bezüglich der Kostenentwicklung. Eine eindeutige Aussage hinsichtlich der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit ist damit nicht möglich, tendenziell kann aber bei hohen Beförderungskapazitäten ein Wirtschaftlichkeitsvorteil für den HO-Bus, bei niedrigen Kapazitäten ein Vorteil für den GL abgeleitet werden.

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

- eine Antriebskonfiguration mit zwei angetriebenen Achsen beim GL,
- die Auswirkungen einer Verlängerung der minimalen Wendezeit um 5% (bezogen auf die Fahrzeit) beim GL, sowie
- eine Erhöhung der Investitions- und Instandhaltungskosten der Oberleitungsinfrastruktur um 50%, z.B. durch einen geringeren oberleitungsfreien Anteil,

dargestellt. Eine Verlängerung der Wende-, und damit der Ladezeit, kann bei hohen Energiebedarf oder besonders verspätungsanfälligen Linien notwendig sein. Die Auswirkungen beziehen sich dabei auf einem linienreinen Betrieb. Sind in den Umlaufplänen Linien Springer zur Steigerung der Fahrplaneffizienz enthalten, können die durch die Ladezeit auftretenden Produktivitätsverluste höher ausfallen

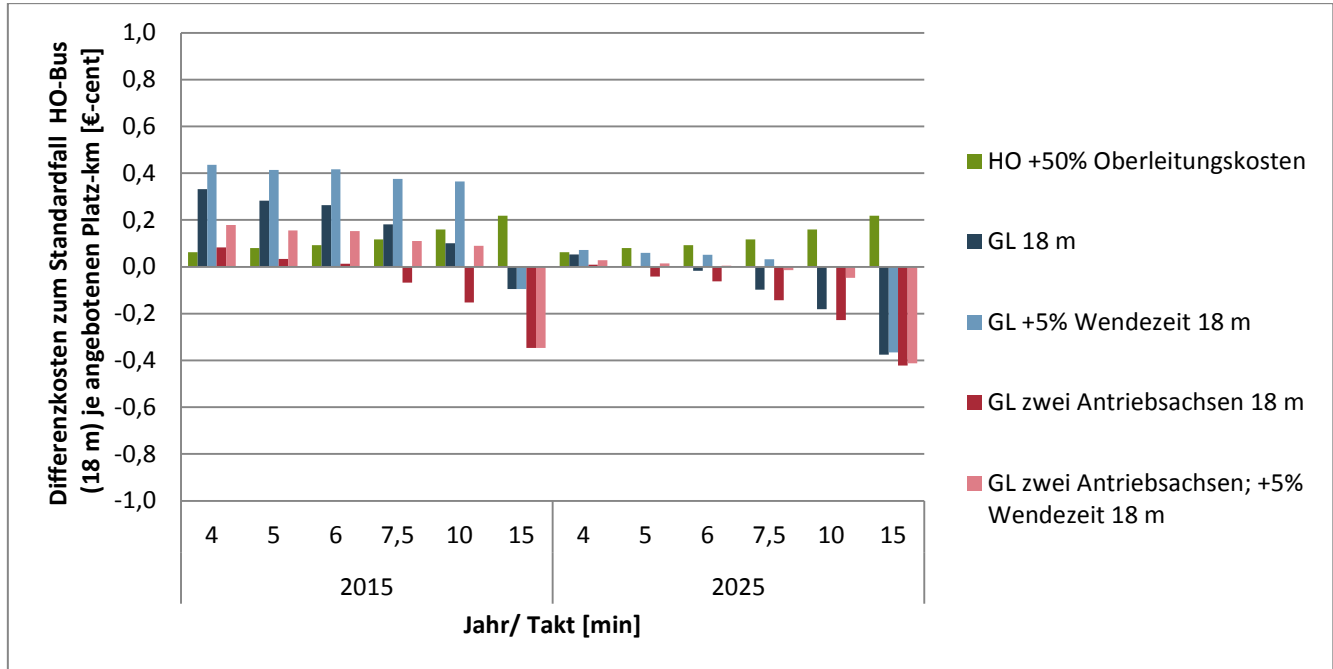


Abbildung 4: Sensitivitäten GL/ HO-Bus: Differenzkosten zum Standardfall HO-Bus je angebotenen Platz-km [€-cent] (positiver Wert => teurer als HO-Bus/ negativer Wert => günstiger als HO-Bus), Gelenkbusse (18 m), 12 Jahre Fahrzeuglebensdauer, jährliche Bus-km: 60.000

Anmerkungen und erste Folgerungen zur Abbildungen 4:

- Zwei angetriebene Achsen führen beim GL sowohl in 2015 als auch in 2025 zu einer Minderung der Kosten je Platz-km. Dies verbessert insbesondere in 2015 die Wirtschaftlichkeit gegenüber dem HO-Bus, so dass auch bei hoher Beförderungskapazität eine Kostenparität erreicht werden kann.
- Wird eine Verlängerung der Wendezeit für einen stabilen Betrieb eines GL benötigt, steigen die Kosten unter den hier betrachteten Annahmen zwischen 4 und 9 % (eine Ausnahme bildet der 15-Minutentakt, indem bereits im Referenzfall ausreichend Wendezeit vorhanden ist) – unter dieser Bedingung kann der HO-Bus auch gegenüber einem mit zwei angetriebenen Achsen ausgestatteten GL wirtschaftlich vorteilhaft sein.
- Solange ein Takt kleiner 15 Minuten betrachtet wird, sind in 2025 auch bei den betrachteten Sensitivitäten die Kostenunterschiede zwischen dem HO-Bus und dem GL im Vergleich mit den vorhandenen Unsicherheiten gering. Bei einem 15-Minuten-Takt ist der GL in jeder betrachteten Sensitivität vorteilhaft.
- Bei kleinen Taktraten wirken sich höhere Oberleitungskosten nur unwesentlich auf die Wirtschaftlichkeit des OL-Busses aus.

Annahmen der Kostenrechnung

Für die Berechnung der Annuitäten wurde in der Kostenrechnung ein Zinssatz von 5% zugrunde gelegt. Die Restwerte der Busse sind nach 12 Jahren mit 5% angenommen, nach 20 Jahren mit 0%.

Tabelle 4: Mittlerer Energieverbrauch Gelenkbus (18m) in kWh/km, 2015, 2025

	2015	2025
Hybrid-Oberleitung	1,8	1,6
Gelegenheitslader	1,8	1,6
Übernachtlader	2,1	1,9
Brennstoffzelle	4,5	4,2
Diesel	5,2	5,0

Tabelle 5: Energiekosten für Verkehrsbetriebe 2015, 2025

		Quelle	2015	2025
Strom	€/kWh	DENA 2011, Pressemitteilung	0,17	0,25
Diesel	€/l	[Prognos, 2010]	1,15	1,65
Wasserstoff	€/kg	[Prognos, 2010]	8,00	5,00

Tabelle 6: Entwicklung Kosten zentraler Komponenten, 2015 - 2030

		Quelle	2015	2020	2025	2030
Batterie	€/kWh	2015 Investitionskosten (Prof. Pütz)/ Entwicklung 2015 - 2030 nach [FH ISI, 2013]	1.000	784	684	622
Brennstoffzelle	€/kW	[McKinsey, 2012], "Production-at-Scale"-Szenario	1.161	609	542	432

Tabelle 7: Energiedichte Batterien

Energiedichte Batterie (Systemebene) Wh/kg			
Batterietyp	Antriebskonzept	2015	2025
Very High Power	HO/ GL/ BZ	68	98
High Power	NL	73	103

Tabelle 8: Austauschzeitpunkte wesentlicher Komponenten während der Buslebensdauer

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

Tabelle 9: Eckdaten Infrastruktur (15 km lange Linie, Einsatz von 15 Bussen)

	Infrastruktur	Ausführung/Anzahl	Kosten gesamt [€]
Hybrid-Oberleitung	Oberleitungen	50% elektrifiziert	3.750.000
	Unterwerke	4	1.720.000
	Langsamladepunkt Betriebshof	15	238.500
Gelegenheitslader	Schnellladepunkt	4	1.000.000 ¹
	Langsamladepunkt Betriebshof	15	238.500
	Unterwerk Betriebshof	1	430.000
Übernachtlander	Langsamladepunkt Betriebshof (60 kW)	15	540.000
	Unterwerk Betriebshof	1	430.000
Brennstoffzelle	Wasserstofftankstelle	25% Anteil an mittel-großer Station	938.250

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

Literaturverzeichnis

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

McKinsey (2012): Urban buses : alternative powertrains for Europe.

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

¹ Für den Schnellladepunkt sind 250.000 € angenommen. Abhängig von den Bedingungen vor Ort können dabei heute Kosten von bis zu 400.000 €/ Ladepunkt auftreten (Mail Dr. Faltenbacher. 24.6.2015)