

Ingelheim
am Rhein

Machbarkeitsuntersuchung

Alternative Antriebe im Stadtbus- verkehr der Stadt Ingelheim am Rhein

Eine Studie der:



Gefördert durch:



Koordiniert von:



Das laufende Projekt „Alternative Antrieb im Stadtbusverkehr der Stadt Ingelheim am Rhein“ wird im Rahmen der Modellregion Elektromobilität mit insgesamt 19.200 € durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur gefördert. Die Modellregionen Elektromobilität werden von der Now GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie koordiniert.

Förderkennzeichen: 03EMK032

Auftraggeber:

Stadtverwaltung Ingelheim am Rhein Neuer Markt 1 55218 Ingelheim am Rhein	Ansprechpartner: Ulrike Zeitz, Telefon: 06132/782-251 Webseite: www.ingelheim.de
---	--

Konzepterstellung:

Transferstelle Bingen (TSB) Berlinstraße 107a 55411 Bingen	Telefon: 06721 / 98 424 0 tsb@tsb-energie.de
--	---

TSB-Projektnummer: 282305	Datum: 22. Juli 2017
----------------------------------	-----------------------------

Projektleitung:

Nina Rauth	Telefon: 06721 / 98 424 255 rauth@tsb-energie.de
------------	---

Bearbeitung:

Nina Rauth	Telefon: 06721 / 98 424 255 rauth@tsb-energie.de
Björn Helsper	Telefon: 06721 / 98 424 228 helsper@tsb-energie.de
Jochen Schied	Telefon: 06721 / 98 424 252 schied@tsb-energie.de
Joachim Walter	Telefon: 06721 / 98 424 250 walter@tsb-energie.de



Transferstelle für Rationelle und Regenerative Energienutzung • Berlinstr. 107a • 55411 Bingen

im

Institut für Innovation, Transfer und Beratung gGmbH

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis.....	8
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Einleitung.....	11
2 Bedarfsanalyse für den Busverkehr ab 2019.....	12
2.1 Überblick Netz.....	12
2.2 Topographie	14
2.3 Überblick Bustypen.....	14
2.4 Analyse Linie 611	15
2.5 Analyse Linie 612	17
2.6 Analyse Linie 613	19
2.7 Analyse Linie 614	21
2.8 Analyse Linie 618/619 (Nachtbus)	22
2.9 Anforderungen an die Busse des ÖPNV Ingelheim ab 2019	23
2.9.1 Zusammenstellung der Analyseergebnisse	23
2.9.2 Weitere Anforderungen aus dem Leistungskatalog	25
3 Eigenschaften alternativer Antriebskonzepte und Markt-analyse	27
3.1 Dieselantrieb.....	29
3.1.1 Technik	29
3.1.2 Kraftstoffverbrauch / Energieeinsatz	29
3.1.3 Verfügbarkeit	29
3.1.4 Investition und Wirtschaftlichkeit.....	29
3.1.5 Infrastruktur	30
3.2 Elektroantrieb	31
3.2.1 Technik	31
3.2.2 Kraftstoffverbrauch / Energieeinsatz	32
3.2.3 Emissionen	33
3.2.4 Investition und Wirtschaftlichkeit.....	33
3.2.5 Infrastruktur / Ladesysteme.....	33

3.2.6	Wartungsaufwand	36
3.2.7	Verfügbarkeit	37
3.2.8	Marktrecherche	38
3.3	Hybridantrieb	40
3.3.1	Technik	40
3.3.2	Kraftstoffverbrauch / Energieeinsatz	41
3.3.3	Emissionen	41
3.3.4	Investition und Wirtschaftlichkeit.....	42
3.3.5	Infrastruktur	42
3.3.6	Verfügbarkeit	42
3.3.7	Marktrecherche	43
3.4	Erdgasantrieb (CNG).....	45
3.4.1	Technik	45
3.4.2	Kraftstoffverbrauch / Energieeinsatz	46
3.4.3	Emissionen	46
3.4.4	Investition und Wirtschaftlichkeit.....	47
3.4.5	Infrastruktur	47
3.4.6	Verfügbarkeit	47
3.4.7	Marktrecherche	48
3.5	Wasserstoff.....	50
3.5.1	Technik	50
3.5.2	Emissionen	50
3.5.3	Infrastruktur	50
3.5.4	Investition und Wirtschaftlichkeit.....	51
3.5.5	Marktrecherche	52
4	Überblick Vorauswahl Busse / Beschreibung der Varianten	53
4.1	Linien 611/618/619 (Solo)	54
4.2	Linien 611/612/613/614/618/619 (Midi)	55
5	Grundlagen, Prämissen und Festlegungen	57
5.1	Allgemeines	57
5.2	Reserven und Verfügbarkeit.....	57

5.3	Antriebskonzepte.....	58
5.3.1	Dieselsbus.....	58
5.3.2	Elektrobus	58
5.3.3	Hybridbus	59
5.3.4	Erdgasbus.....	61
5.4	Kosten für Infrastruktur	62
5.4.1	Elektrobus	62
5.4.2	Erdgasbus.....	64
5.5	Entwicklung der Kraftstoffpreise	65
5.6	Fördermöglichkeiten	66
5.6.1	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)	66
5.6.2	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur(BMVI)	66
5.6.3	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)	67
6	Energie- und CO₂-Emissionsbilanz.....	68
6.1	Energiebilanzen.....	68
6.2	CO ₂ -Emissionsbilanzen.....	71
7	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	73
7.1	Investitionskosten	73
7.2	Jahreskosten.....	76
7.3	Dynamik der Energiepreise	79
7.4	Variante Eigenstromerzeugung.....	82
7.5	Dynamik der Investitionskosten der Elektrobusse	83
8	Ergebnisse, Empfehlungen und weitere Vorgehensweise.....	85
8.1	Ergebnisse der Bilanzbetrachtungen und Empfehlungen	85
8.1.1	Elektrobusse (Variante 1a u. 1b)	85
8.1.2	Hybridbusse (Variante 2)	86
8.1.3	Erdgasbusse (CNG, Variante 3)	86
8.2	Fazit und weitere Vorgehensweise.....	87
9	Literaturverzeichnis.....	88

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Überblick Linienplan Ingelheim	13
Abbildung 2-2: Fahrzeugvarianten (BPV Consult GmbH, 2016)	14
Abbildung 2-3: Überblick Linie 611	15
Abbildung 2-4: Topographischer Verlauf Linie 611	16
Abbildung 2-5: Überblick Linie 612	17
Abbildung 2-6: Topographischer Verlauf Linie 612	18
Abbildung 2-7: Überblick Linie 613	19
Abbildung 2-8: Topographischer Verlauf Linie 613	20
Abbildung 2-9: Überblick Linie 614	21
Abbildung 3-1: Projektlandkarte – Übersicht der an der AG Innovative Antriebe Bus teilnehmende Projekte (BMVI, 2015)	28
Abbildung 3-2: Typische Zusammensetzung der fahrzeugbezogene Kosten eines konventionellen Dieselbusses (BMVI, 2015)	30
Abbildung 3-3: Fahren und Rekuperation (Sileo, 2017)	31
Abbildung 3-4: Batteriebus – Betrachtung Energieverbrauch für Fahrantrieb und Heizung Fahrgastraum (BMVI, 2015)	33
Abbildung 3-5: Aufladung über eine Ladestation (Stadt Hamburg, 2017)	34
Abbildung 3-6: Aufladung über Oberleitungen (Greencarcongress, 2016)	35
Abbildung 3-7: Aufladung über Onboard-Pantografen (gas2, 2014)	35
Abbildung 3-8: Aufladung über Onboard-Pantografen (Golem Media GmbH, 2017)	36
Abbildung 3-9: Verfügbarkeit Elektrobusse (BMVI, 2015)	37
Abbildung 3-10: Volvo Hybrid Bus (Volvo, 2017)	41
Abbildung 3-11: Verfügbarkeit Hybridbusse (BMVI, 2015)	42
Abbildung 3-12: Erdgasmotor, Abgasanlage und Tankinstrumentarium (Blickpunkt, 2016)	45
Abbildung 3-13: Gasdruckbehälter auf Busdach (MAN, 2017)	45
Abbildung 3-14: Emissionen im Vergleich (MAN, 2017)	46
Abbildung 3-15: Wasserstoff-Tankstellen (NOW, 2017)	51
Abbildung 5-1: Verknüpfungssystematik Bahnhof Ingelheim Mo-Fr, Sa-Vormittag [BPV 2016]	62
Abbildung 5-2: Verknüpfungssystematik Bahnhof Ingelheim Sa-Nachmittag, Sonn-/Feiertag	62

Abbildung 5-3: Busdepot Ingelheim (Wendling, 2017)	63
Abbildung 5-4: Busbahnhof Ingelheim (Wendling, 2017)	64
Abbildung 5-5: Entwicklung der Verbraucherpreise für Energieträger (Industriepreise zzgl. MwSt)	65
Abbildung 6-1: Energieverbrauch der Linien 611, 618, 619 (Solo)	70
Abbildung 6-2: Energieverbrauch der Linien 611-619 (Midi)	70
Abbildung 6-3: CO ₂ -Emissionen der Linien 611, 618, 619 (Solo)	72
Abbildung 6-4: CO ₂ -Emissionen der Linien 611-619 (Midi)	72
Abbildung 7-1: Investitionskosten Solobusse	75
Abbildung 7-2: Investitionskosten Midibusse	75
Abbildung 7-3: Jahreskosten Solobusse	78
Abbildung 7-4: Jahreskosten Midibusse	78
Abbildung 5: Entwicklung der Verbrauchskosten mit den Energiepreisen (Solobusse)	79
Abbildung 6: Entwicklung der Jahreskosten mit den Energiepreisen (Solobusse)	80
Abbildung 7: Entwicklung der Amortisationszeiten mit den Energiepreisen (Solobusse)	80
Abbildung 8: Entwicklung der Verbrauchskosten mit den Energiepreisen (Midibusse)	81
Abbildung 9: Entwicklung der Jahreskosten mit den Energiepreisen (Midibusse)	81
Abbildung 10: Entwicklung der Amortisationszeiten mit den Energiepreisen (Midibusse)	82
Abbildung 11: Entwicklung der Verbrauchskosten bei selbst erzeugtem Strom (Solobusse)	82
Abbildung 12: Entwicklung der Verbrauchskosten bei selbst erzeugtem Strom (Midibusse)	83
Abbildung 13: Entwicklung der Jahreskosten bei Reduzierung der Investition (Solobusse)	84
Abbildung 14: Entwicklung der Jahreskosten bei Reduzierung der Investition (Midibusse)	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Zusammenstellung Charakteristik Linie 611	15
Tabelle 2-2: Zusammenstellung Streckenlängen Linie 611	16
Tabelle 2-3: Zusammenstellung Charakteristik Linie 612	17
Tabelle 2-4: Zusammenstellung Streckenlängen Linie 612	18
Tabelle 2-5: Zusammenstellung Charakteristik Linie 613	19
Tabelle 2-6: Zusammenstellung Streckenlängen Linie 613	20
Tabelle 2-7: Zusammenstellung Charakteristik Linie 614	21
Tabelle 2-8: Zusammenstellung Charakteristik Linie 618	22
Tabelle 2-9: Zusammenstellung Charakteristik Linie 619	22
Tabelle 2-10: Zusammenstellung Charakteristika u. Anforderungen 1	23
Tabelle 2-11: Zusammenstellung Charakteristika u. Anforderungen 2	24
Tabelle 3-1: Überblick Marktanalyse Elektrobusse - SOLO	38
Tabelle 3-2: Marktrecherche Elektrobusse - MIDI	39
Tabelle 3-3: Marktrecherche Hybridbusse - SOLO	43
Tabelle 3-4: Marktrecherche Hybridbusse - MIDI	44
Tabelle 3-5: Marktrecherche CNG - SOLO	48
Tabelle 3-6: Marktrecherche CNG - MIDI	49
Tabelle 3-7: Marktrecherche H2-BZ - SOLO	52
Tabelle 4-1: Vorauswahl mögliche Hersteller SOLO	54
Tabelle 4-2: Vorauswahl mögliche Hersteller MIDI	55
Tabelle 5-1: Kennwerte Dieselbus	58
Tabelle 5-2: Kennwerte Elektrobus	59
Tabelle 5-3: Eignung der Stecken für den Hybridbusbetrieb	59
Tabelle 5-4: Kennwerte Hybridbus	60
Tabelle 5-5: Kennwerte Erdgasbus	61
Tabelle 5-6: Kosten für Stromversorgung Depot und Bahnhof	63
Tabelle 6-1: Energiebilanz Solobusse	68
Tabelle 6-2: Energiebilanz Midibusse	69

Tabelle 6-3: Emissionsbilanz Solobusse	71
Tabelle 6-4: Emissionsbilanz Midibusse.....	71
Tabelle 7-1: Investitionskosten Solobusse.....	73
Tabelle 7-2: Investitionskosten Midibusse	74
Tabelle 7-3: Jahreskosten Solobusse	76
Tabelle 7-4: Jahreskosten Midibusse	77

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
BZ	Brennstoffzelle
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
GIS	Geoinformationssystem
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
Li	Lithium
m ²	Quadratmeter
MWh	Megawattstunden
NiMH	Nickel-Metallhydrid
ÖPNV	öffentlichen Personennahverkehr
SONE	psychoakustische Maßeinheit für die subjektive Lautheit eines Schallereignisses
t	Tonne
THG	Treibhausgas

1 Einleitung

Aufgrund des fortschreitenden Klimawandels und seinen Folgen sowie die Endlichkeit der fossilen Brennstoffe und die damit verbundenen steigenden Kosten für Importe, ist es eine der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts, Maßnahmen zu ergreifen um die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen in einem kontrollierbaren Rahmen zu halten. Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020 um 40 %, bezogen auf das Basisjahr 1990, zu reduzieren [UBA 2011]. Um diese Ziele erreichen zu können werden im Sektor Verkehr, der mit 28 % einen erheblichen Anteil des Primärenergieverbrauchs in Deutschland im Jahr 2012 ausmacht [BMWi 2012], Alternativen zum klassischen Antrieb mit Verbrennungsmotor angestrebt.

Durch den Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität wurden bereits im Jahr 2009 erste wichtige Schritte für die Mobilität der Zukunft eingeleitet. So hat sich die Bundesregierung das Ziel gesetzt, dass bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren sollen [NEE 2009]. Dazu ist es erforderlich in den nächsten Jahren bei der Batterietechnologie Fortschritte zu erzielen und eine Batterieladeinfrastruktur aufzubauen. Durch die noch zu überwindenden Herausforderungen in technischen und wirtschaftlichen Bereichen ist eine breite Markteinführung für den Individualverkehr (IV) momentan noch nicht möglich. Dabei spielt vor allem die begrenzte Reichweite der elektrischen Antriebe eine wesentliche Rolle. Aber auf lokaler bzw. auf regionaler Ebene lassen sich solche Vorhaben leichter umsetzen. Dabei ist gerade der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) in Städten und Gemeinden prädestiniert dafür mit Elektroantrieben ausgestattet zu werden, da im Gegensatz zum Individualverkehr die Planbarkeit von Fahrstrecken im ÖPNV zu 100 % gegeben ist.

Um lokal entstehende Emissionen zu reduzieren kommen weltweit in immer mehr Städten Elektrobusse im alltäglichen Linienverkehr zu Testzwecken zum Einsatz.

2 Bedarfsanalyse für den Busverkehr ab 2019

2.1 Überblick Netz

Die Planung von BPV, welche mit der Stadt Ingelheim zusammen erarbeitet wurde, sieht folgendes vor: (BPV Consult GmbH, 2016):

- Sternsystem mit zentralem Verknüpfungspunkt am Bahnhof Ingelheim; Rundum-Anschluss zwischen den Linien nach dem Rendezvous-Prinzip
- Stadtbus-Durchmesserlinien (8 Linienäste vom Bahnhof ausgehend)
- Taktsystem alle 30 oder 60 Minuten (bzw. alle 60 oder 120 Minuten samstagnachmittags, sonn- und feiertags), abschnittsweise gemeinsames Bedienungsangebot alle 15 oder 30 Minuten durch mehrere Linien
- Ausdehnung der Stadtbus-Qualität auf die bisherige VG Heidesheim
- Abstimmung mit dem (eigenwirtschaftlichen) lokalen Busverkehr; Integration der Linie 620 in die Stadtbus-Taktsystematik (beabsichtigt)
- Einsatz von 5 Niederflur-Solo- oder Niederflur-Midibussen im Taktverkehr; Einsatz weiterer Fahrzeuge als Verstärker im Schülerverkehr
- 2 Nachtbus-Linien zur täglichen Bedienung aller Stadtteile alle 60 Minuten
- Über 130 Stadtbus- bzw. Nachtbus-Haltepunkte im Stadtgebiet

Diese Vorgaben dienen als Grundlage der vorliegenden Betrachtung, genauso der geplante Fahrplan (Stand Oktober 2016). Folgende Linien werden betrachtet:

Stadtbus-Linien:

611 Frei-Weinheim Schifferstr. ◀ ▶ Bahnhof ◀ ▶ Nieder-Ingelheim Im Herstell

612 Frei-Weinheim Friedhof ◀ ▶ Bahnhof ◀ ▶ Ober-Ingelheim Ohrenbrücke

613 Ingelheim-West Birkenstr. ◀ ▶ Bahnhof ◀ ▶ Ober-Ingelheim Stiegelpforte

614 Regionalbad/Sporkenheim ◀ ▶ Bahnhof ◀ ▶ Heidenfahrt Ort

Nachtbus-Linien:

618 Bahnhof ▶ Frei-Weinheim ▶ Großwinternheim ▶ Bahnhof

619 Bahnhof ▶ Blumengarten ▶ Bahnhof ▶ Wackernheim ▶ Uhlerborn ▶ Bahnhof

Die **Schülerbeförderung** wurde nicht in die Betrachtung einbezogen, da es sich hier um reine Verstärkerfahrten mit niedrigen km-Leistungen handelt. Aufgrund der geringen Betriebszeiten, der vergleichbar hohen Anzahl an Bussen und geringen Fahrleistung ist davon auszugehen, dass die spezifischen Kosten für alternative Antriebssysteme sehr hoch sein werden.

Alternative Antriebe erfordern eine gute Auslastung der Busse, um die höheren Investitionskosten rechtfertigen zu können. Im Einvernehmen mit der Stadt Ingelheim wurde daher festgelegt, die Schülerbeförderung weiterhin mit konventionellen Antrieben auf Basis des Dieselmotors fortzuführen.

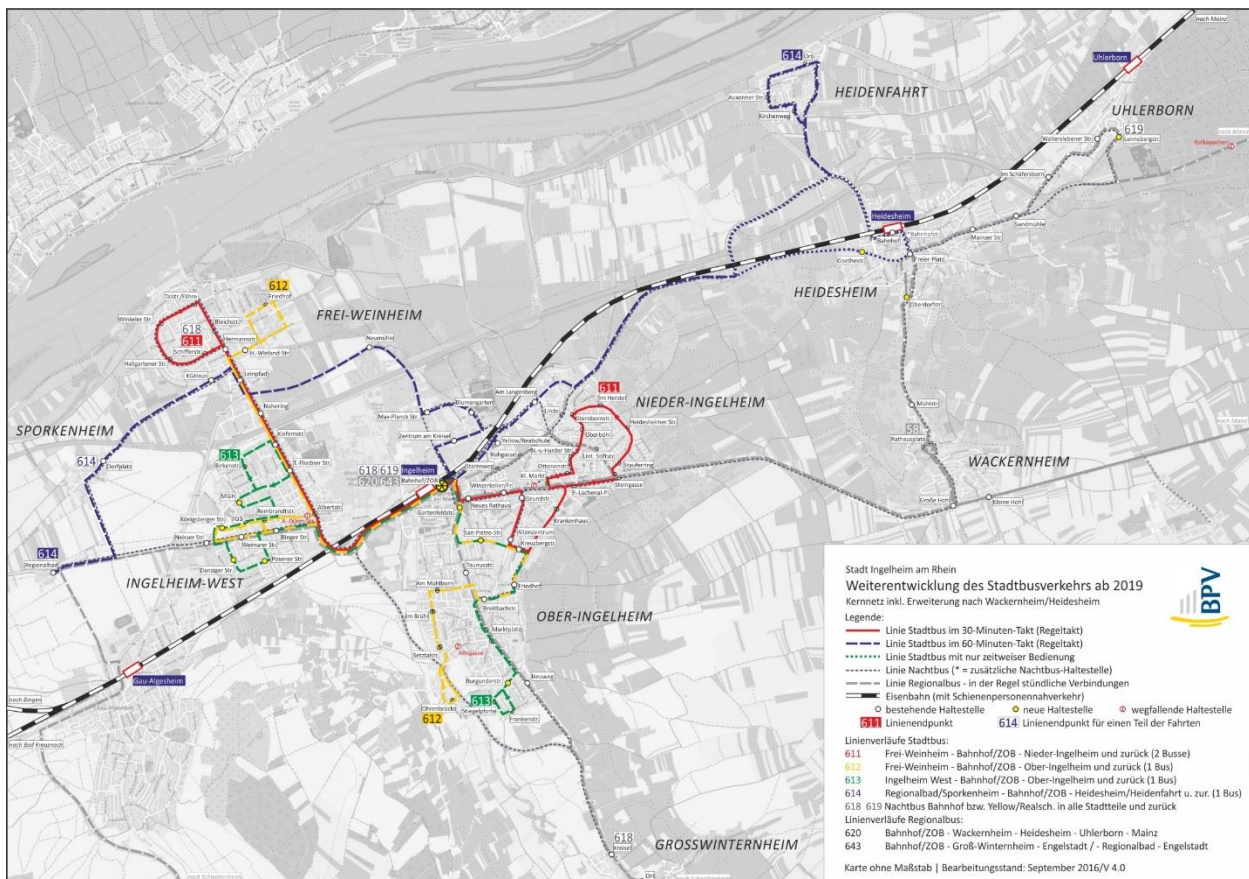


Abbildung 2-1: Überblick Linienplan Ingelheim

Die Auswertungen der einzelnen Linien basieren auf den von BPV zur Verfügung gestellten Daten.

2.2 Topographie

Um die Nutzbarkeit batterieelektrischer Busse in ÖPNV Ingelheim bewerten zu können, wurde der topographische Verlauf der einzelnen Linien über ein Geoinformationssystem (GIS) erfasst. Die Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

2.3 Überblick Bustypen

Unterschieden wird zwischen den Bustypen Mini, Midi und Solo.

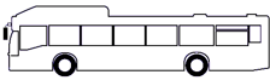
			
	Minibus	Midibus	Standard- Solobus
Fahrzeuglänge	6 bis 9 m	8,5 bis 10,5 m	10,5 bis 12,5 m
Fahrzeugbreite	1,9 bis 2,1 m	2,35 bis 2,5 m	2,55 m
Anzahl Sitzplätze	12 bis 22	20 bis 26	30 bis 38
Anzahl Stehplätze	6 bis 8	11 bis 17	40 bis 55
Tankinhalt	ca. 75 l	ca. 140 l	ca. 280 l
Leistung	70 bis 140 kW	125 bis 190 kW	180 bis 260 kW
Verbrauch/100km	ca. 15 bis 20 l	ca. 25 bis 35 l	ca. 35 bis 45 l
Kaufpreis	ca. 130.000 €	ca. 200.000 €	ca. 240.000 €

Abbildung 2-2: Fahrzeugvarianten (BPV Consult GmbH, 2016)

Den einzelnen Linien sind die entsprechenden Bustypen zugeordnet.

2.4 Analyse Linie 611

Die Linie weist folgende Charakteristika auf:

Tabelle 2-1: Zusammenstellung Charakteristik Linie 611

Fahrstrecke	Frei-Weinheim Schifferstr. ◀ ▶ Bahnhof ◀ ▶ Nieder-Ingelheim Im Herstell	
Buseinsatz	2 Solo (Mo-Sa) 1 Midi (So/Feiertag)	
Linien- charakteristika	Fahrzeit: 52 min/h Strecke: 151.400 km/a Fahrzeit: 8.400 h/a	2 Solo: 141.300 km/a <u>Midi: 10.100 km/a</u> Summe: 151.400 km/a (netto)

Die jährliche Fahrstrecke ist als hoch einzustufen. Allerdings verteilt sie sich auf drei Busse, wobei der Midi-Bus den geringsten Anteil aufweist.

Die Linie 611 weist bei einer reinen Fahrzeit von 52 Minuten pro Stunde nur sehr geringe Pausenzeiten auf.

Im Laufe des Samstags erfolgt für das Wochenende eine Umstellung vom 30-Minuten- auf einen 60-Minuten-Takt. Die Sonntagsfahrten werden von einem Midi-Bus übernommen.

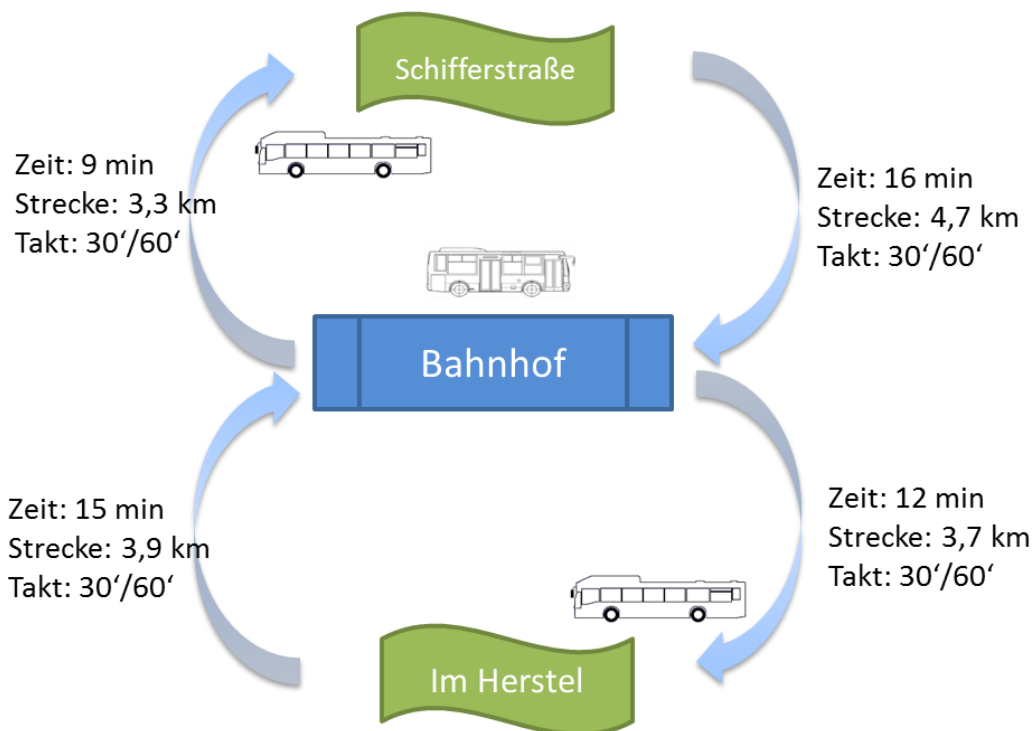


Abbildung 2-3: Überblick Linie 611

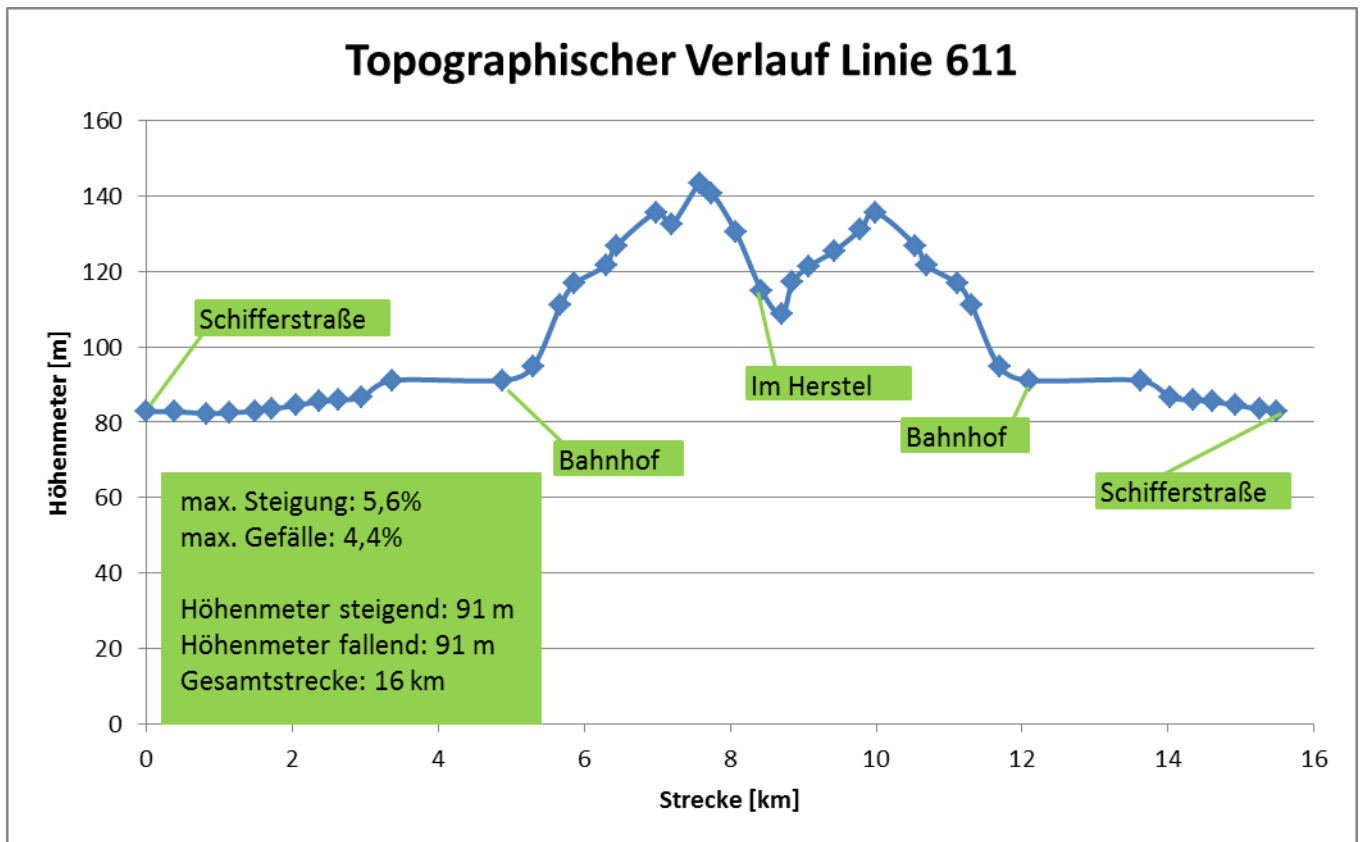


Abbildung 2-4: Topographischer Verlauf Linie 611

Ein Umlauf der Line 611 umfasst rund 16 km. Hierbei werden 91 Höhenmeter steigend und die identische Anzahl fallend zurückgelegt. Die max. Steigung umfasst rund 5,6 % (zwischen Haltestelle Im Herstel und der Sternbornstraße), das max. Gefälle hingegen liegt nur bei 4,4 % (zwischen Stauferring und Heidesheimer Straße). Die Anzahl der Umläufe und der eingesetzten Fahrzeuge variiert zwischen Wochentag (zwei Solobusse; 31 Umläufe), Samstag (ein Solobus; 15 Umläufe) und Sonn- und Feiertagen (ein Midibus; 11 Umläufe). Hierdurch unterscheiden sich ebenfalls die Gesamtleistung sowie die zu überwindenden Höhenmeter je nach Wochentag und Wochenende.

Tabelle 2-2: Zusammenstellung Streckenlängen Linie 611

Wochentag	Gesamtstrecke [km]	Umläufe	Höhenmeter steigend [m]	Höhenmeter fallend [m]
Montag bis Freitag	480	31	2.808	2.808
Samstag	232	15	1.360	1.360
Sonntag u. Feiertag	170	11	996	996

2.5 Analyse Linie 612

Die Linie weist folgende Charakteristika auf:

Tabelle 2-3: Zusammenstellung Charakteristik Linie 612

Fahrstrecke	Frei-Weinheim Friedhof ◀ ▶ Bahnhof ◀ ▶ Ober-Ingelheim Ohrenbrücke
Buseinsatz	1 NF-Midi
Linien- charakteristika	Fahrzeit: 52 min/h Strecke: 96.800 km/a Fahrzeit: 4.500 h/a

Die jährliche Fahrstrecke ist als mittel einzustufen.

Die Linie 612 weist bei einer reinen Fahrzeit von 52 Minuten pro Stunde nur sehr geringe Pausenzeiten auf.

Die Linie verkehrt im 60-Minuten-Takt und wird mit einem Midi-Bus bewerkstelligt.

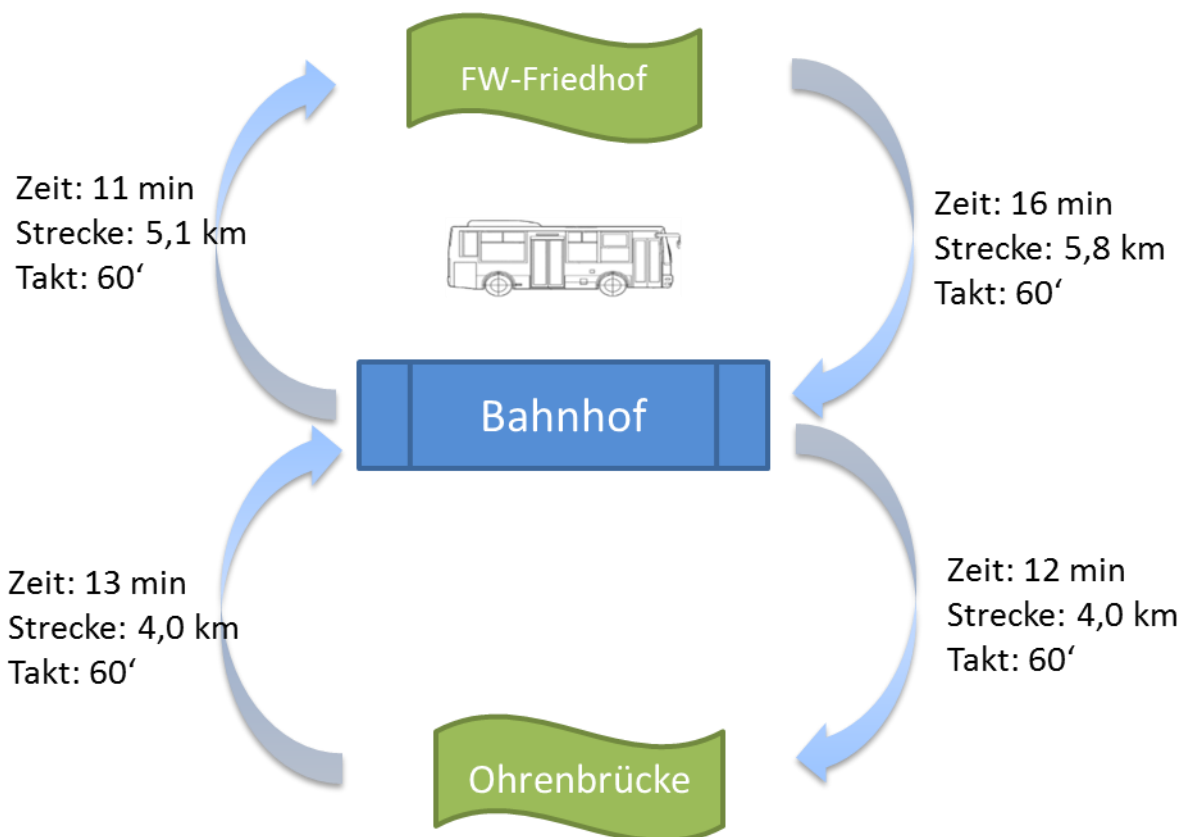


Abbildung 2-5: Überblick Linie 612

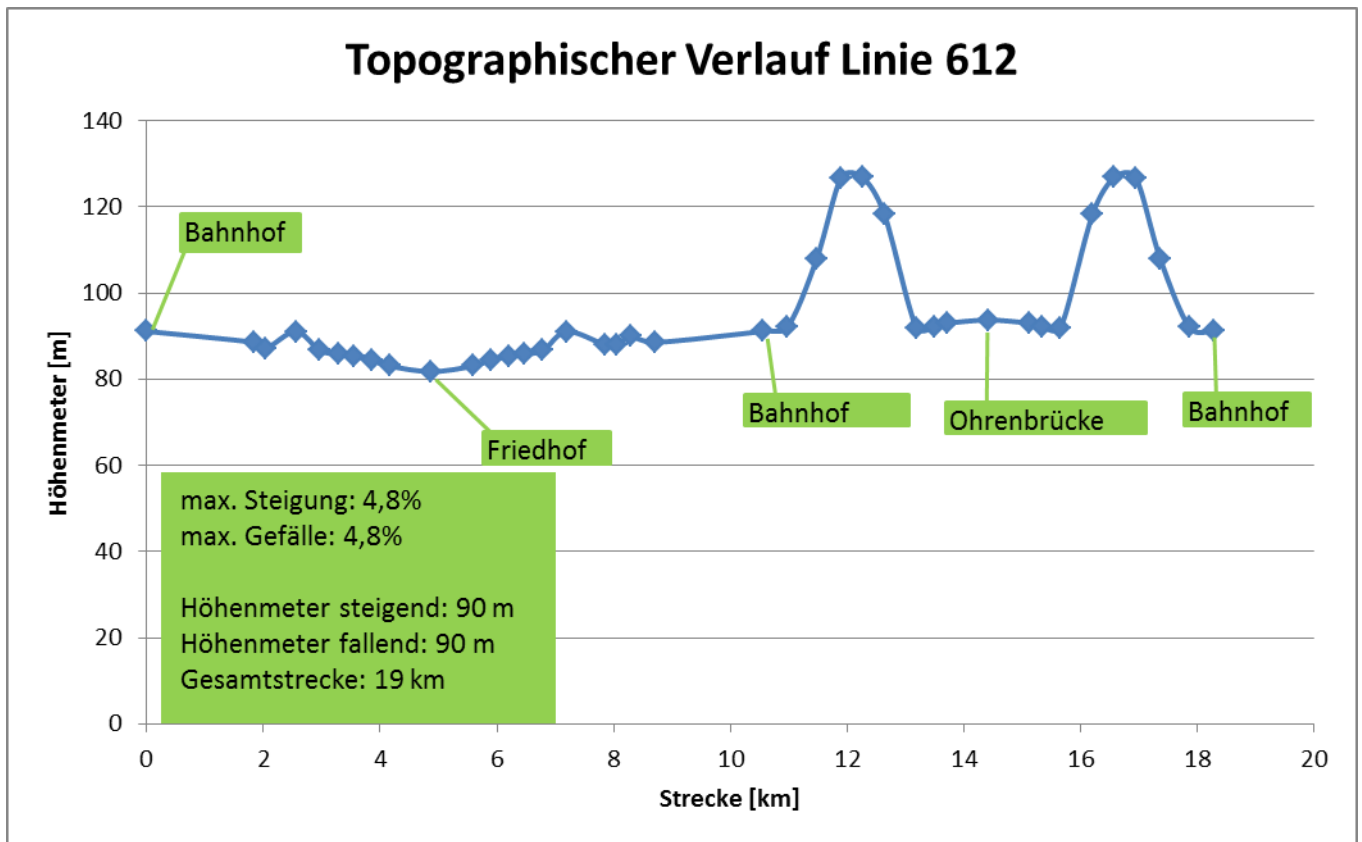


Abbildung 2-6: Topographischer Verlauf Linie 612

Ein Umlauf der Line 612 umfasst rund 19 km. Hierbei werden 90 Höhenmeter steigend und die identische Anzahl fallend zurückgelegt. Die max. Steigung umfasst rund 4,8 % (zwischen Haltestelle Im Brühl und Am Mühlborn), das max. Gefälle liegt ebenfalls bei 4,8 % (zwischen Haltestelle Friedhof und Breitenbachstraße). Die Anzahl der Umläufe variiert zwischen Wochentag (15 Umläufe), Samstag (14 Umläufe) und Sonn- und Feiertagen (10 Umläufe). Hierdurch unterscheiden sich ebenfalls die Gesamtleistung sowie die zu überwindenden Höhenmeter je nach Wochentag und Wochenende.

Tabelle 2-4: Zusammenstellung Streckenlängen Linie 612

Wochentag	Gesamtstrecke [km]	Umläufe	Höhenmeter steigend [m]	Höhenmeter fallend [m]
Montag bis Freitag	274	15	1.350	1.350
Samstag	256	14	1.260	1.260
Sonntag u. Feiertag	183	10	900	90

2.6 Analyse Linie 613

Die Linie weist folgende Charakteristika auf:

Tabelle 2-5: Zusammenstellung Charakteristik Linie 613

Fahrstrecke	Ingelheim-West Birkenstr. ◀ ▶ Bahnhof ◀ ▶ Ober-Ingelheim Stiegepforte
Buseinsatz	1 Midi
Linien- charakteristika	Fahrzeit: 52 min/h Strecke: 75.000 km/a Fahrzeit: 3.900 h/a

Die jährliche Fahrstrecke ist als mittel einzustufen.

Die Linie 613 weist bei einer reinen Fahrzeit von 52 Minuten pro Stunde nur sehr geringe Pausenzeiten auf. Die Linie verkehrt im 60- bzw. 120-Minuten-Takt und wird mit einem Midi-Bus bewerkstelligt.

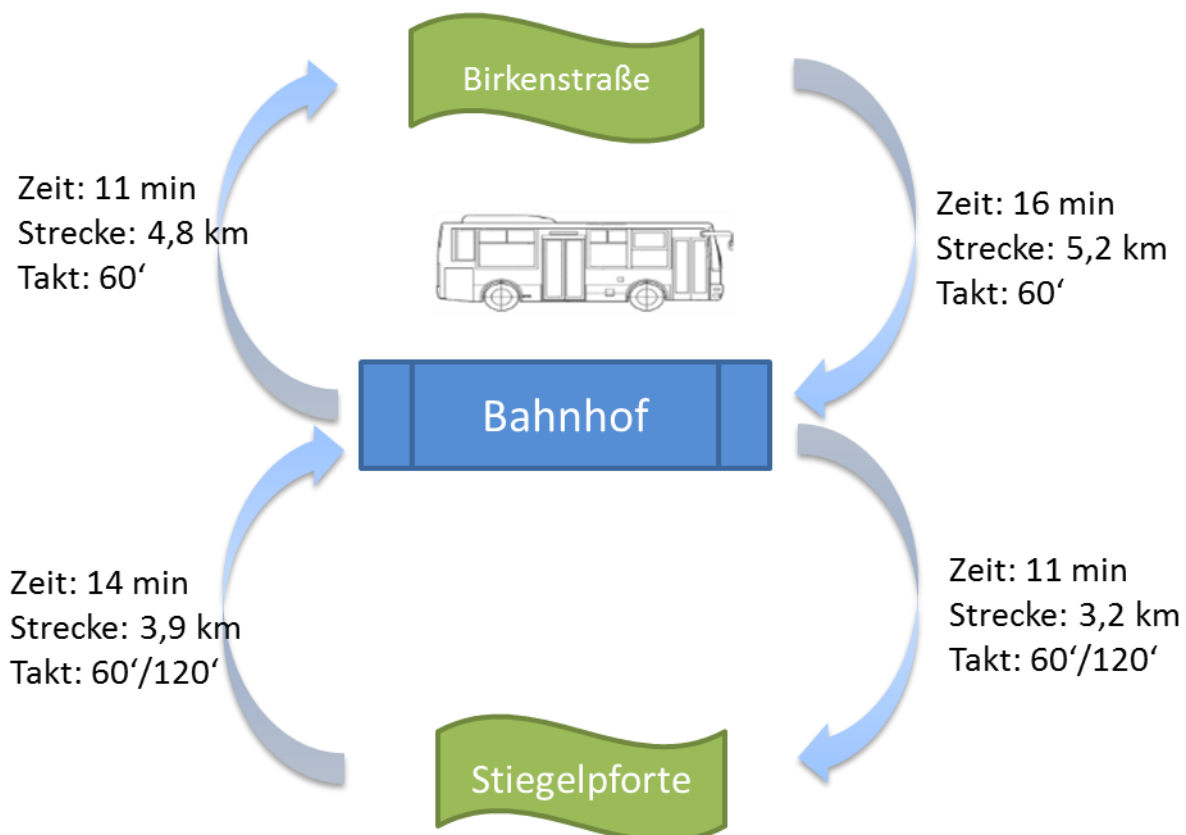


Abbildung 2-7: Überblick Linie 613

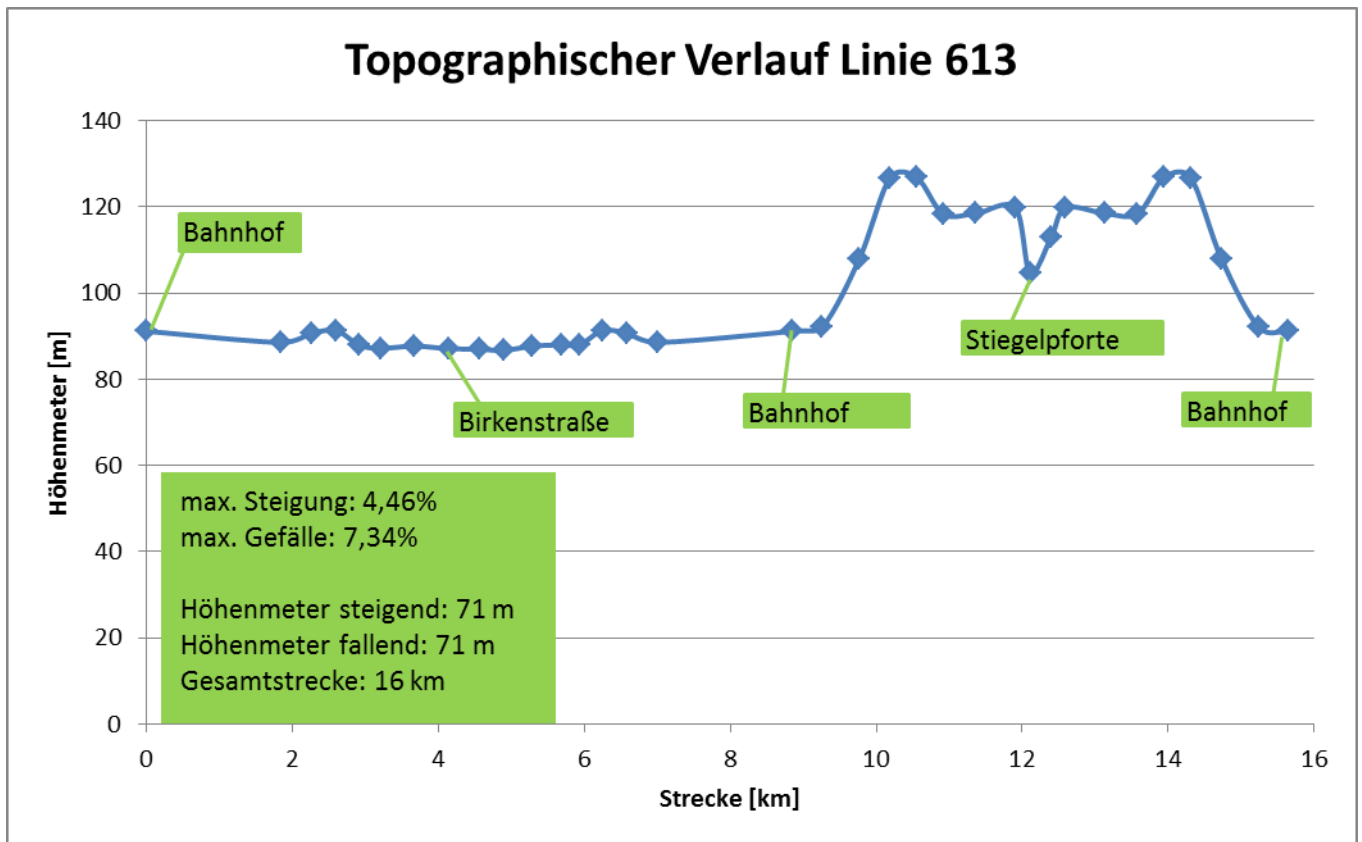


Abbildung 2-8: Topographischer Verlauf Linie 613

Ein Umlauf der Line 613 umfasst rund 16 km. Hierbei werden 71 Höhenmeter steigend und die identische Anzahl fallend zurückgelegt. Die max. Steigung umfasst rund 4,5 % (zwischen Haltestelle Gartenfeldstraße und San-Pietro-Straße), das max. Gefälle liegt ebenfalls bei 7,34 % (zwischen Haltestelle Marktplatz und Burgunderstraße). Die Anzahl der Umläufe variiert zwischen Wochentag (15 Umläufe), Samstag (8 Umläufe) und Sonn- und Feiertagen (5 Umläufe). Hierdurch unterscheiden sich ebenfalls die Gesamtaufleistung sowie die zu überwindenden Höhenmeter je nach Wochentag und Wochenende.

Tabelle 2-6: Zusammenstellung Streckenlängen Linie 613

Wochentag	Gesamtstrecke [km]	Umläufe	Höhenmeter steigend [m]	Höhenmeter fallend [m]
Montag bis Freitag	235	15	1.070	1.070
Samstag	125	8	570	570
Sonntag u. Feiertag	78	5	360	360

2.7 Analyse Linie 614

Die Linie weist folgende Charakteristika auf:

Tabelle 2-7: Zusammenstellung Charakteristik Linie 614

Fahrstrecke	Regionalbad/Sporkenheim ◀ ▶ Bahnhof ◀ ▶ Heidenfahrt Ort
Buseinsatz	1 Midi
Linien- charakteristika	Fahrzeit: 43 min/h Strecke: 140.700 km/a Fahrzeit: 4.100 h/a

Die jährliche Fahrstrecke ist als sehr hoch einzustufen.

Die Linie 614 weist bei einer reinen Fahrzeit von 43 Minuten pro Stunde nur keine großen Pausenzeiten auf. Die Linie verkehrt im 60- bzw. 120-Minuten-Takt und wird mit einem Midi-Bus bewerkstelligt.

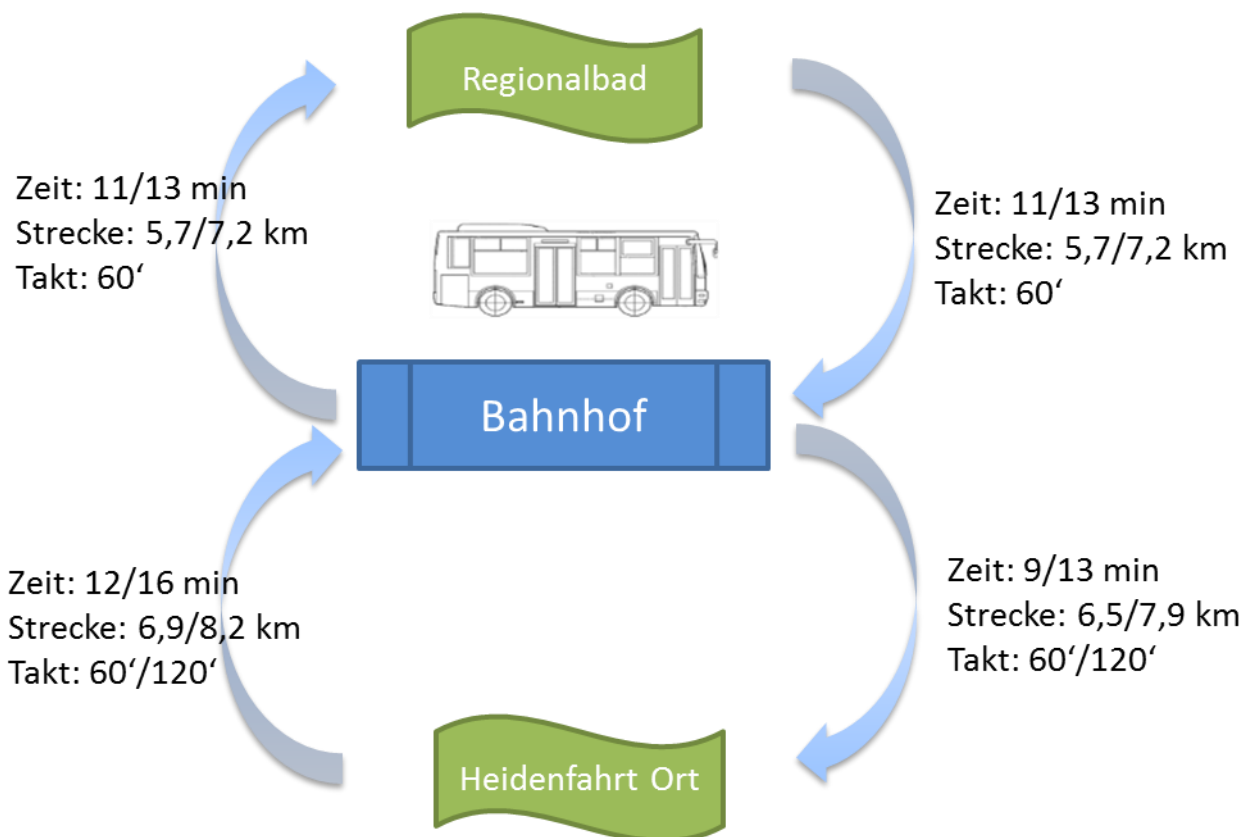


Abbildung 2-9: Überblick Linie 614

2.8 Analyse Linie 618/619 (Nachtbus)

Die Betriebszeit der beiden Nachtbuslinien liegt zwischen 21 und 2 Uhr. Es sind keine zusätzlichen Busse vorgesehen. Die Abdeckung erfolgt über Busse der anderen Linien.

Die Linien weist folgende Charakteristika auf:

Tabelle 2-8: Zusammenstellung Charakteristik Linie 618

Fahrstrecke	Bahnhof ► Frei-Weinheim ► Großwinternheim ► Bahnhof
Buseinsatz	1 NF-Solo B, 1 NF Midi
Linien- charakteristika	Takt: 60' Umlaufzeit: 57/58 Min. Pause: 2/3 Min.
	Solo: 23.200 km/a <u>Midi: 3.100 km/a</u> Summe: 26.300 km/a (netto)

Tabelle 2-9: Zusammenstellung Charakteristik Linie 619

Fahrstrecke	Bahnhof ► Blumengarten ► Bahnhof ► Wackernheim ► Uhlerborn ► Bahnhof
Buseinsatz	1 NF-Solo B, 1 NF Midi
Linien- charakteristika	Takt: 60' Umlaufzeit: 49 Min. Pause: 11 Min.
	Solo: 22.800 km/a <u>Midi: 3.000 km/a</u> Summe: 25.800 km/a (netto)

Die jährliche Fahrstrecke ist in beiden Linien als gering einzustufen.

Die Linien weisen bei einer reinen Fahrzeit von 49 bzw. 57 Minuten pro Stunde nur geringe Pausenzeiten auf.

2.9 Anforderungen an die Busse des ÖPNV Ingelheim ab 2019

2.9.1 Zusammenstellung der Analyseergebnisse

Folgende Tabellen zeigen zusammengestellt die Ergebnisse der Bedarfsanalyse.

Tabelle 2-10: Zusammenstellung Charakteristika u. Anforderungen 1

Linie	Art Bus	Anzahl Busse	Strecke netto ¹ [km/a]	Fahrzeit netto [h/a]	Auslastung netto [km/a/Bus]
611	Solo	2	141.300	7.851	70.650
611	Midi	1	10.100	554	10.100
612	Midi	1	96.800	4.500	96.800
613	Midi	1	75.000	3.900	75.000
614	Midi	1	140.700	4.100	140.700
618	Solo	-	23.200	880	23.200
618	Midi	-	3.100	118	3.100
619	Solo	-	22.800	747	22.800
619	Midi	-	3.000	100	3.000
Summe			516.000	22.700	

¹ Netto: reine Bedienung der Haltestellen (ohne Leerfahrten)

Tabelle 2-11: Zusammenstellung Charakteristika u. Anforderungen 2

Linie	Art Bus	Anzahl Busse	Strecke brutto ² [km/a]	Betriebs-/ La- dezeit [Std./d]	Strecke brutto [km/d/Bus]
611	Solo	2	153.500	16 / 8	264 /195 ³
611	Midi	1	12.500	11 / 13	204 ⁴
612	Midi	1	111.100	15 / 9	324 /305/229 ⁵
613	Midi	1	88.600	15 / 9	297 /198/56 ⁵
614	Midi	1	155.100	15 / 9	468 /398/272 ⁵
618	Solo	-	26.200	6	62/ 135 / 135 ⁶
618	Midi	-	3.800	2	62 ⁴
619	Solo	-	25.900	6	60/ 135 / 135 ⁶
619	Midi	-	3.600	3	60 ⁴
Summe			580.300		

Die netto-Werte beinhalten die reine Bedienung der Haltestellen. Bei den brutto-Werten sind für Leerfahrten pauschal 10 km pro Tag eingerechnet. Die Berechnungen von BPV weisen Leerfahrten pauschal mit 10% aus. In der vorliegenden Betrachtung wurden etwas höhere Werte gewählt, da diese die örtlichen Gegebenheiten besser widerspiegeln und zudem mehr Puffer aufweisen.

In den Tabellen ist ersichtlich, dass es in den einzelnen Linien große Unterschiede bei der Auslastung bzw. täglichen Fahrstrecke gibt.

Da die Tagesstrecken der einzelnen Linien variieren (in Abhängigkeit vom Wochentag), erfolgt die weitere **Auslegung** im Folgenden **mit den maximalen Werten** (in Tabelle 2-11 fett markiert).

² Brutto: inkl. 10 km/d Leerfahrten

³ Mo-Fr/Sa

⁴ So, Feiertag

⁵ Mo-Fr/Sa/So, Feiertag

⁶ Mo-Do/Fr/Sa

Für die Linien 611 bis 614 werden **zwei Solo-Busse und vier Midi-Busse** benötigt. Für die Nachtbuslinien sind laut (BPV Consult GmbH, 2016) keine separaten Busse eingeplant. Da sich die Linien ergänzen und nicht überschneiden, ist es – bei konventionellem Antrieb - möglich, dass die vorhandenen Busse die Nachtlinien bedienen. Bei alternativen Antrieben ist dies zu hinterfragen, da Elektrobusse beispielsweise genügend Zeit zum Laden benötigen. Dies gestaltet sich schwierig, wenn noch ein Nachtbetrieb vorhanden ist.

2.9.2 Weitere Anforderungen aus dem Leistungskatalog

Für den Einsatz von Bussen im regulären Linienbetrieb der Stadt Ingelheim am Rhein gibt es neben der Erfüllung des Fahrplanbetriebs weitere Anforderungen, die erfüllt werden müssen. Der Transferstelle Bingen wurde der Leistungskatalog für die Ausschreibung aus 2016 zur Verfügung gestellt (Stadt Ingelheim a.R., 2016). Unter den Punkten 2.1 Sicherheitsanforderungen u. 2.3 Anforderungen an die eingesetzten Fahrzeuge werden Kriterien formuliert.

Barrierefreiheit: Im gesamten ÖPNV müssen die Standards der Barrierefreiheit erfüllt sein. Gemäß dem Behindertengleichstellungsgesetz des Bundes § 4 ist der Begriff Barrierefreiheit folgendermaßen definiert (MBJV, 2017):

„Barrierefrei sind bauliche und sonstige Anlagen, Verkehrsmittel, technische Gebrauchsgegenstände, Systeme der Informationsverarbeitung, akustische und visuelle Informationsquellen und Kommunikationseinrichtungen sowie andere gestaltete Lebensbereiche, wenn sie für behinderte Menschen in der allgemein üblichen Weise, ohne besondere Erschwernis und grundsätzlich ohne fremde Hilfe zugänglich und nutzbar sind“.

Das Behindertengleichstellungsgesetz bezieht sich bei dem Begriff der Barrierefreiheit aber lediglich auf die Gleichstellung von Personen mit Behinderungen, lässt dabei aber andere Personengruppen mit einer Mobilitätseinschränkung unberücksichtigt. Im weitergehenden Verständnis der Barrierefreiheit wird nicht mehr zwischen einzelnen Personengruppen unterschieden. Es wird vielmehr angestrebt, dass alle Personen in die allgemein übliche Nutzung der gestalteten Umwelt einbezogen werden (Bundeskompetenzzentrum Barrierefreiheit, 2017).

Die Einführung der Niederflurtechnik im ÖPNV basiert auf der Gestaltung einer barrierefreien Umwelt. Dabei sind die Verkehrsmittel mit einem ebenen und **stufenlosen Fahrzeugboden** von der Vordertür bis mindestens hinter die Mitteltür ausgestattet. Die maximale Einstiegshöhe ist auf 320 mm, plus einen Toleranzbereich von 20 mm festgelegt. Zusätzlich sind die heutigen Busse mit einem **Kneeling-System** ausgestattet. Dadurch kann der Bus auf der Einstiegsseite pneumatisch abgesenkt werden, so dass entweder an einer Tür eine Einstiegshöhe von 250 mm oder an zwei Türen eine Einstiegshöhe von jeweils 270 mm erreicht wird. In Verbindung mit einer entsprechenden Haltestelleninfrastruktur ist somit ein stufenloser Zugang zu den Omni-

bussen hergestellt. Für einen barrierefreien Einstieg mit einem Rollstuhl muss mindestens an einer Tür eine **Rampe** (mechanisch oder elektrisch) als zusätzliche Einstiegshilfe ausgeklappt werden können (Deutscher Behindertenrat).

So müssen im Sinne der Barrierefreiheit also vorhanden sein:

- Niederflurtechnik
- Absenkvorrichtung (Kneelingfunktion)
- Klapprampe für Rollstuhlfahrer

Temperierung: Eine weitere Anforderung ist die Temperierung des Busses im Sommer und Winter. Für den Fahrgastbetrieb in den Wintermonaten muss gewährleistet sein, dass der Bus über eine ausreichend starke Heizung verfügt. Während der Sommermonate muss das Cockpit über eine Klimaanlage temperierbar sein. Ob auch der Fahrgastraum zu temperieren ist, wurde nicht abschließend festgelegt.

Fahrscheinkauf: Zudem muss sichergestellt werden, dass der Fahrgast die Möglichkeit besitzt einen gültigen Fahrschein im Bus zu erwerben.

Weitere Kriterien aus Leistungskatalog sind:

- Sicherheitsanforderungen (Einklemmschutz, ABS, zuverlässige Kommunikationstechnik, Reifenprofil)
- Fahrzeugalter max. 8 Jahre, Durchschnitt 6 Jahre
- Es sind ausreichend Reservefahrzeuge vorzuhalten
- Ausreichende Belüftung
- Haltewunschtasten, „Wagen hält“-Anzeige
- Automatische Ansage-/Anzeigesysteme der Haltestellen

3 Eigenschaften alternativer Antriebskonzepte und Marktanalyse

Aufgrund der in den letzten Jahren strenger gewordenen gesetzlichen Auflagen, wie z. B. Emissionsvorschriften oder die Einführung von Umweltzonen in Städten sowie eine drohende Verknappung der Rohölvorkommen und der hierdurch stetig steigenden Kraftstoffpreise, wird die Entwicklung von verbesserten und alternativen Antrieben für Fahrzeuge vorangetrieben.

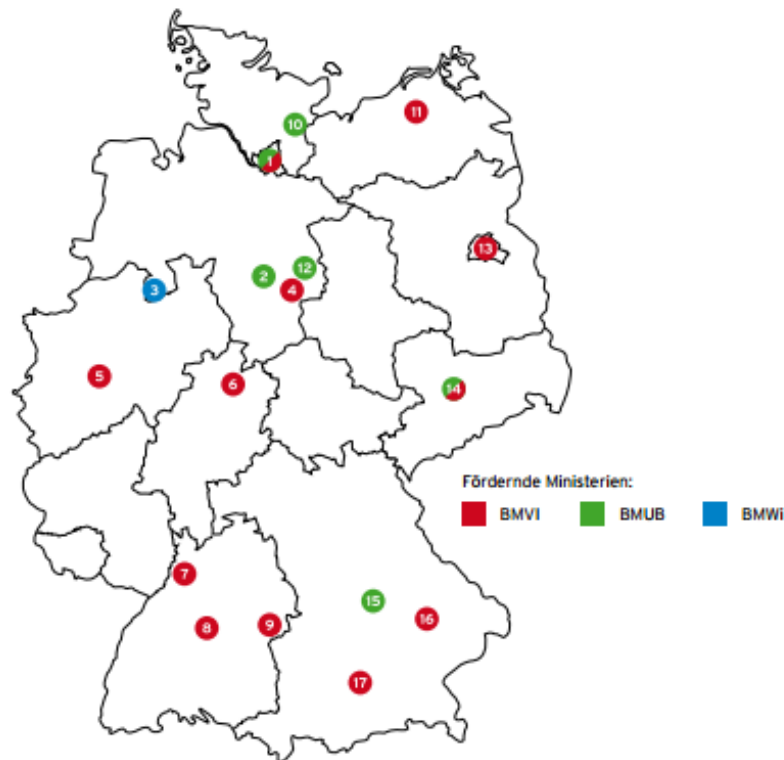
Alternative Antriebssysteme unterscheiden sich von den am Markt etablierten Verbrennungsmotoren (Otto- und Dieselmotor). Dieser Unterschied kann zum einen in der Elektrifizierung des Antriebsstrangs, von Hybrid- bis hin zu rein batterieelektrischen Fahrzeugen liegen, zum anderen können auch alternative Kraftstoffe, wie beispielsweise Erdgas oder Wasserstoff eingesetzt werden. Die alternativen Antriebe können dabei helfen, den Energieverbrauch und die daran gekoppelten Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) zu reduzieren. Zudem können diese Technologien und Konzepte mit dazu beitragen, die Mobilität hierzulande unabhängiger von teuren Erdölimporten zu gestalten (Helsper, 2014).

Als Alternativen zum herkömmlichen Dieselmotor kommen folgende Antriebskonzepte in Betracht:

- Erdgasantrieb,
- Elektroantrieb (Elektrifizierung des Antriebsstranges mit Speicherung der Energie im Bus (Batterien)),
- Hybridantrieb mit Elektro- und Verbrennungsmotor
- Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen (mit elektrischem Antriebsstrang)

Folgende Abbildung gibt einen Auszug über laufende Projekte, bei denen die verschiedenen Antriebskonzepte erprobt werden (Stand 2015). Inzwischen sind noch zahlreiche weitere Umsetzungen realisiert, verstärkt im Bereich der Elektrobusse.

29 Projekte
34 Betreiber
171 Dieselhybridbusse
86 Solobusse
85 Gelenkbusse
25 Elektrobusse
12 BZ Busse



G = Gelenk
S = Solo
M = Mini-/Midi
E = Elektro
BZ = Brennstoffzelle
P = Plug-In Hybrid

1 Hybridbusse für Stadtverkehr HH
VB Hamburg-Holstein (10 S)
eBTO
Hamburger Hochbahn (5 G)
ErPaD
Hamburger Hochbahn (5 S, 15 G)
HELD
Hamburger Hochbahn (3 SP, 3 SE)
SaHyb
Jasper (17 S), Süderelbe Bus (5 S)
NaBuZ demo
Hamburger Hochbahn (4 S BZ, 2 G BZ)

2 Hybridbusse in Hannover üstra (10 G)
Emissionsfreier Nahverkehr für Hannover üstra (3 SE)

3 Hub Osnabrück
Stadtwerke Osnabrück AG (2 ME)

4 EMIL
Braunschweiger Verkehrs-AG (1 SE, 4 GE)
5 EFBEL
Verkehrsverbund Rhein Ruhr
• Krefeld • SWK Mobil (4 G)
• Hagener Straßenbahn (2 S, 2 G)
• Dortmund • TRD Reisen (2 S)
• Bochum • BOGESTRA (5 G)
RVK
H2 Busse (2 S BZ, 2 G BZ)

6 FREE
Kassel • Regionalmanagement Nordhessen (1 ME)

7 Primove Mannheim
Mannheim • RNV GmbH (2 SE)

8 Hyline S
Stuttgart • SSB (5G + 5 GP)
S presso
Stuttgart • SSB (4 S BZ)

9 ElvoDrive
Voith AG (1 S)

10 Hybridbusse für einen umweltfreundlichen ÖPNV
Stadtverkehr Lübeck (5 S, 5 G)

11 Inmod Mecklenburg-Vorpommern
GBB (1 ME), BBW (1 S), AVG (1 S)

12 Hybridbus Wolfsburg
Wolfsburger Verkehrsgesellschaft (3 S)

13 E-bus Berlin
BVG (4 SE)

14 RegioHybrid
Regiobus Mittelsachsen (10 S)
Dresden • DVB (3 S, 3 G)
Leipzig • LVB (3 G)
5 weitere Betreiber (11 S)
SaxHybrid
Dresden • DVB (10 G)
Leipzig • LVB (10 G)
SaxHybrid Plus
FhG IVI (1 PG)
Linie 79
Dresden • DVB (1 SE)
eBus Batterfly
Leipzig • LVB (2 SE)
eBus Skorpion
Leipzig • LVB
gefördert durch Sächsisches Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr

15 Hybridbusse für Ingolstadt
Stadtbus Ingolstadt (3 S)

16 Primove Road
Pilsting (1 SE)

17 Hybridbuserprobung
Münchener Verkehrsgesellschaft (MVG) (2 S, 2 G)

Abbildung 3-1: Projektlandkarte – Übersicht der an der AG Innovative Antriebe Bus teilnehmende Projekte (BMVI, 2015)

Nachfolgend wird eine Analyse der sich auf dem Markt befindlichen alternativen Antriebskonzepte für Busse im ÖPNV durchgeführt. Schwerpunkt hierbei ist eine Bewertung der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Antriebsarten für den Einsatz in der betrachteten Region.

3.1 Dieselantrieb

3.1.1 Technik

Deutschlandweit werden zurzeit über 90 % aller in den Städten eingesetzten Busse mit Diesel betrieben. Die Technologie des Dieselmotors wurde seit seiner Erfindung im Jahr 1893 von Rudolf Diesel über die Zeit immer weiterentwickelt und optimiert. Durch Maßnahmen wie z. B. Turbo-Aufladung und Downsizing, Direkteinspritzung oder die Verwendung eines Partikelfilters konnten in den letzten Jahren erhebliche Effizienz- und Leistungssteigerungen bei Dieselmotoren erreicht werden. Gleichzeitig wurden die Emissionen deutlich reduziert.

Die Stärken des Dieselmotors liegen in der bekannten und ausgereiften Technik sowie in der hohen Reichweite. Eine weitere Optimierung der Dieselmotoren ist aus technischer Sicht möglich, wird jedoch mit einer deutlichen Kostensteigerung verbunden sein.

Auch stehen die zurzeit verstärkt diskutierten Fahrverbote von Dieselfahrzeugen in deutschen Städten im Fokus und die eventuellen Konsequenzen hieraus sollten bedacht werden. Es ist von Seiten der Politik noch keine abschließende Regelung für den Einsatz von dieselbetriebenen Bussen im ÖPNV in den Städten, bzw. welche Schadstoffklasse der Fahrzeuge hier noch einsetzbar sind, getroffen worden. Diese Entwicklung sollte bei der bestehenden Neuvergabe sowie bei Ersatzbeschaffungen berücksichtigt werden.

3.1.2 Kraftstoffverbrauch / Energieeinsatz

Moderne Dieselmotoren weisen Wirkungsgrade von bis zu 43 % auf, jedoch wird immer noch mehr als die Hälfte der chemischen Energie des eingesetzten Kraftstoffs als Wärme an die Umgebung abgegeben. Der Kraftstoffverbrauch eines ÖPNV-Busses ist stark von der Topografie, der Anzahl der Haltestellen und Anteile des Stadt- bzw. Überlandverkehrs abhängig.

Der Kraftstoffverbrauch im ÖPNV Ingelheim liegt aktuell bei etwa 42 l/100 km. (Mader, 2016)

3.1.3 Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit von konventionellen Dieselnbussen liegt bei über 90%. (BMVI, 2015) Nachfolgend wird von einem Wert von 94% ausgegangen.

3.1.4 Investition und Wirtschaftlichkeit

Investitionskosten für einen Solo-Bus liegen bei etwa 240.000 € und für einen Midi-Bus bei 200.000 €.

Die Gesamtkosten für Diesel-Solobusse liegen bei etwa 1,25 €/km (inkl. Versorgung, Kapitalkosten, Instandhaltung und Verbrauch). (BMVI, 2015) Diese verteilen sich wie folgt:

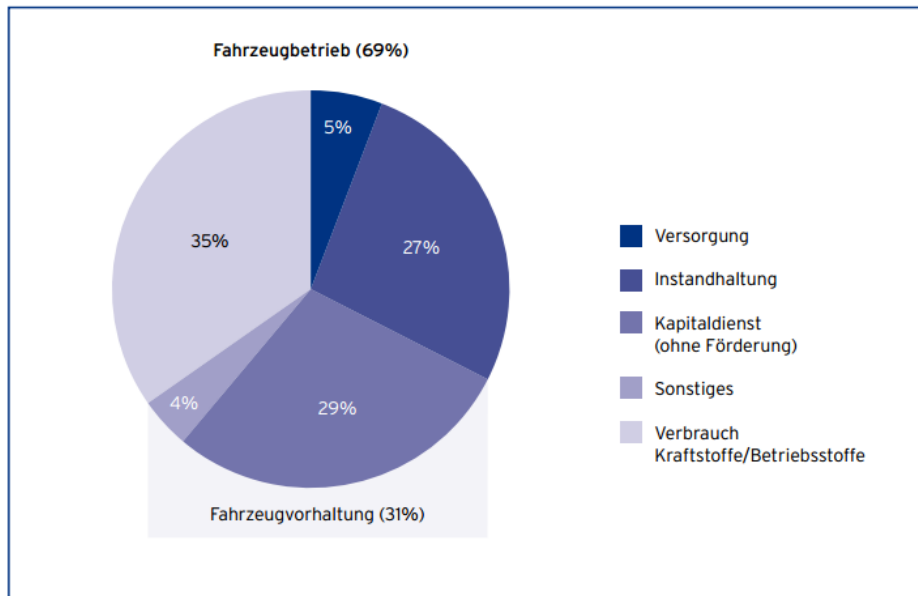


Abbildung 3-2: Typische Zusammensetzung der fahrzeugbezogene Kosten eines konventionellen Dieselbusses (BMVI, 2015) ⁷

3.1.5 Infrastruktur

Die Betankung der Busse ist unproblematisch. Es ist davon auszugehen, dass jeder Anbieter über eine entsprechende Tankstelle verfügt bzw. vorhandene Tankstelleninfrastruktur vor Ort nutzen kann.

⁷ Versorgung: Reinigung, Betankung

3.2 Elektroantrieb

3.2.1 Technik

Elektromotoren erzielen mit ca. 90 % deutlich höhere **Wirkungsgrade** als Dieselmotoren mit bis zu 43 % (reell bei ca. 25-30%). Bei einem Verbrennungsmotor wird etwa zwei Drittel der Energie des Kraftstoffes als Wärme an die Umgebung abgegeben. Dieser Effizienzvorteil des Elektromotors macht sich besonders im Nah- und Stadtverkehr bemerkbar, wo Verbrennungsmotoren meist sehr unwirtschaftlich arbeiten.

Einen weiteren Effizienzvorteil besitzt der Elektromotor beim **rekuperativen Bremsen**. Hierbei dient dieser selbst als Generator, welcher bei einem Bremsvorgang kinetische in elektrische Energie umwandelt, diese an die Akkumulatoren weiterleitet und speichert. Hierdurch kann ein Anteil der Antriebsenergie zurückgewonnen und beim Anfahrvorgang eingesetzt werden.



Abbildung 3-3: Fahren und Rekuperation (Sileo, 2017)

Zudem besitzen Elektrofahrzeuge gegenüber einem konventionell angetriebenen Fahrzeug den Vorteil geringerer **Wartungskosten**. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein Elektromotor einem geringeren Verschleiß ausgesetzt ist, was im Wesentlichen an seinem einfacheren Aufbau mit weniger bewegten Teilen liegt. Zudem kommt ein Elektrofahrzeug auch ohne Kupplung, Getriebe, Auspuffanlage usw. aus.

Die Nachteile eines Elektroantriebs gegenüber einem konventionellen Verbrennungsmotor sind in erster Linie die geringen Speicherkapazitäten der heutigen **Akkumulatoren** und die sich hieraus ergebenden vergleichbar geringe Reichweite von Elektrofahrzeugen. Auch die langen Ladezeiten der Akkumulatoren können problematisch sein. Zudem sind die Anschaffungskosten für Elektrofahrzeuge zu vergleichbaren konventionellen Fahrzeugen signifikant höher. Dies ist in erster Linie den Akkumulatoren zuzuschreiben. Je höher die Kapazität der eingesetzten Akkumulatoren ist, desto höher ist auch der Anschaffungspreis des Fahrzeuges.

Die Stromspeicherung erfolgt über Batterien, wobei hier Lithium-Ionen-Akkumulatoren (Li-Ionen) die höchste Energiedichte aufweisen und dementsprechend oft eingesetzt werden. Auch Nickel-Metallhydrid-Akkumulator (NiMH-Akkumulatoren) kommen zum Einsatz. Alternativ werden sog. Ultra- oder Supercaps (Kondensatoren) eingesetzt. Diese erlauben neben der Schnellladung an Endhaltestellen auch eine schnelle Zwischenladung mit hoher Leistung.

3.2.2 Kraftstoffverbrauch / Energieeinsatz

Bei Elektrofahrzeugen müssen Nebenaggregate, wie z. B. **Heizung und Klimaanlage**, unterdruckverstärkte Bremsen und Servo-Lenkung, die bisher bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen vom Verbrennungsmotor angetrieben wurden, ebenfalls aus der Batterie mit Energie versorgt werden. Dies wirkt sich zusätzlich negativ auf die Reichweite der Fahrzeuge aus. Darüber hinaus entfällt die Abwärme des Verbrennungsmotors, so dass eine Heizung nicht mehr ohne weiteres vorhanden ist. Zwar entsteht auch bei einem Elektromotor, der Batterie sowie der Leistungselektronik Abwärme, die in einigen Fällen aktiv gekühlt werden muss, zum Heizen eines Fahrzeuges ist diese aber nicht ausreichend. Die Heizung kann entweder elektrisch betrieben werden, was wiederum die Reichweite reduziert, oder es muss zusätzlich ein über andere Energieträger betriebenes Heizungsaggregat (z. B. Dieselheizung) installiert werden. Die Nebenaggregate müssen so optimiert werden, dass sie sich dem Fahrbetrieb automatisch anpassen (Umweltbundesamt, 2014). Technisch ist es mit einigen der sich am Markt befindenden eBussen möglich, eine Strecke mit 200 km/d und darüber hinaus bei allen Witterungsverhältnissen problemlos zu bedienen.

Folgende Abbildung zeigt, dass die Heizung in den Wintermonaten fast die Hälfte des Energieverbrauchs ausmacht. Hiermit halbiert sich die Reichweite der Busse. Abhilfe schafft hier die Beheizung des Fahrgastraums über ein zusätzliches Dieselaggregat (ca. 10 l/100 km Zusatzverbrauch bei Batteriebusen im Gegensatz zu etwa 2 l/100 km bei Dieselbussen, da diese zusätzlich die Motorabwärme zur Beheizung nutzen). Im Jahresmittel ist damit zu rechnen, dass 40% des Energieverbrauchs auf die Heizung entfallen und ein Mehrverbrauch von ca. 17% für eine Klimatisierung anfällt. (BMVI, 2015)

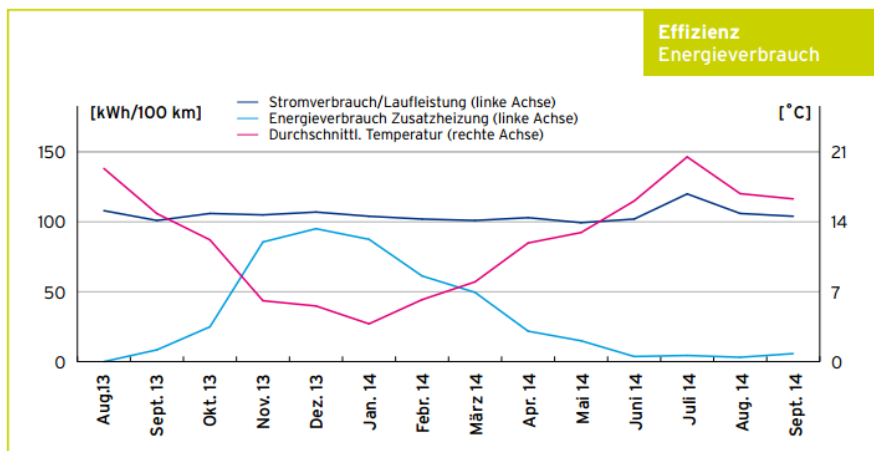


Abbildung 3-4: Batteriebus – Betrachtung Energieverbrauch für Fahrtrieb und Heizung Fahrgastraum (BMVI, 2015)

3.2.3 Emissionen

Die Vorteile eines zu 100 % elektrischen Antriebs liegen zum einen darin, dass eine nahezu emissionsfreie Mobilität ermöglicht wird, unter der Maßgabe, dass der hier eingesetzte Strom für diese Fahrzeuge aus Erneuerbaren Energien stammt. Im Gegensatz zu einem konventionell, mit fossilen Kraftstoff betriebenen Motor, entstehen durch einen Elektroantrieb keinerlei lokale CO₂e- und Ruß-Emissionen in seinem Einsatzgebiet. Des Weiteren verursacht der Elektroantrieb erheblich weniger Geräusch- und Staubemissionen als ein Verbrennungsmotor.

3.2.4 Investition und Wirtschaftlichkeit

Für Solo-Busse ist mit einer Investition von etwa 500.000 € bis 650.000 € brutto zu rechnen (je nach Hersteller, Ausstattung und Ladeleistungen).

3.2.5 Infrastruktur / Ladesysteme

Im folgenden Kapitel werden die unterschiedlichen Ladesysteme betrachtet, welche für einen Einsatz in Ingelheim am Rhein in Fragen kommen könnten. Hierbei wird grundsätzlich zwischen den Verfahren des konduktiven und des induktiven Ladens unterschieden, wobei bei letzterem die Gelegenheitsnachladung, d.h. das schnelle Nachladen an (End-)Haltestellen im Vordergrund steht. (BMVI, 2015) Durch das „gelegentliche“ Laden weisen die Busse generell eine längere Betriebszeit auf, lange Aufladezeiten über Nacht werden vermieden. Dem induktiven Laden kommt derzeit jedoch noch wenig Bedeutung und wird derzeit nur in Pilotprojekten umgesetzt,

auch aufgrund der höheren Kosten und Problemen wie Kurzschlüssen (Tagesspiegel, 2016) zu. Etabliert ist das konduktive Laden über Stromstecker oder Pantograph. Generell wird die Bus-technik bei Bestellung auf das jeweilige Ladesystem angepasst.

Konduktive Ladesysteme

Beim konduktiven Ladevorgang ist der Akkumulator über ein Kabel mit der Ladestation verbunden. Hierbei stellt eine haushaltsübliche Steckdose mit 230 V / 16 A die einfachste Variante da. Diese ermöglicht eine Ladeleistung von maximal 3,7 kW_{el}. Über einen Drehstromanschluss mit 400 V (AC) und Stromstärken von 16 A oder 32 A können Ladeleistungen von 11 kW_{el} bzw. 22 kW_{el} übertragen werden. Durch Erhöhung der Stromstärke auf 64 A steigt die Ladeleistung auf bis zu 44,3 kW_{el} (Schraven, 2010). Mittlerweile sind Gleichstrom-Schnellladungen mit Leistungen von bis zu 500 kW_{el} möglich, wodurch sich die Ladezeit deutlich reduziert (Rohlf & Winter, 2015). Die Ladezeit steht in Abhängigkeit zu der Kapazität des Akkumulators. Bei einer Kapazität von 200 kWh_{el}, würde sich die Ladezeit für eine 100%-Ladung auf weniger als eine halbe Stunde verringern.



Abbildung 3-5: Aufladung über eine Ladestation (Stadt Hamburg, 2017)



Abbildung 3-6: Aufladung über Oberleitungen (Greencarcongress, 2016)

Das Laden durch ein **Oberleitungssystem** wird ebenfalls zum konduktiven Laden gezählt. Diese Systeme werden schon seit 1879 verwendet. Zum überwiegenden Teil kommen diese bei Zügen aber auch in mehreren Städten bei Linienbussen zu Einsatz. Jedoch beruhen diese Systeme auf einer kontinuierlichen Energiezufuhr ohne Speicher. Heutige Oberleitungsladesysteme hingegen setzen auf eine diskontinuierliche Energieversorgung. Hierdurch ist es möglich die Oberleitungen nur an bestimmten Punkten der Fahrstrecke zu installieren (Liempt, 2011), wodurch die Installations- und Instandhaltungskosten deutlich reduziert werden können. Wenn der Bus sich in der vorgegebenen Ladeposition befindet, setzt ein **Pantograph** (Ladearm) zum Laden an. Hierbei werden zwei Systeme unterschieden (Siemens, 2015):

- DC-Schnellladung mit Offboard-Pantograph, kommt in Hamburg bei der Hochbahn zum Einsatz
- DC-Quelle mit Onboard-Pantografen, wird in Wien eingesetzt



Abbildung 3-7: Aufladung über Onboard-Pantografen (gas2, 2014)

Induktive Ladung

Die kabellose Energieübertragung beruht auf dem Prinzip eines Transformators. Der Unterschied zwischen Transformator und der induktiven Ladung besteht darin, dass die zwei Hauptkomponenten Primär- und Sekundärspule mechanisch voneinander getrennt sind. Die Primärspule ist hierbei ortsfest in der Fahrbahndecke, an einem oder mehreren Punkten der Fahrstrecke (z. B. Haltestellen) verbaut und mit dem Stromnetz verbunden. Die Sekundärspule ist am Unterboden des Linienbusses angebracht. Für einen Ladevorgang wird der Bus mit der Sekundärspule über der Primärspule geparkt. Das Aufladen des Akkumulators läuft automatisch und ohne direkten Kontakt ab. So könnte das Ein- bzw. Aussteigen der Fahrgäste für eventuell notwendige Zwischenladungen genutzt werden (Schraven, 2010).

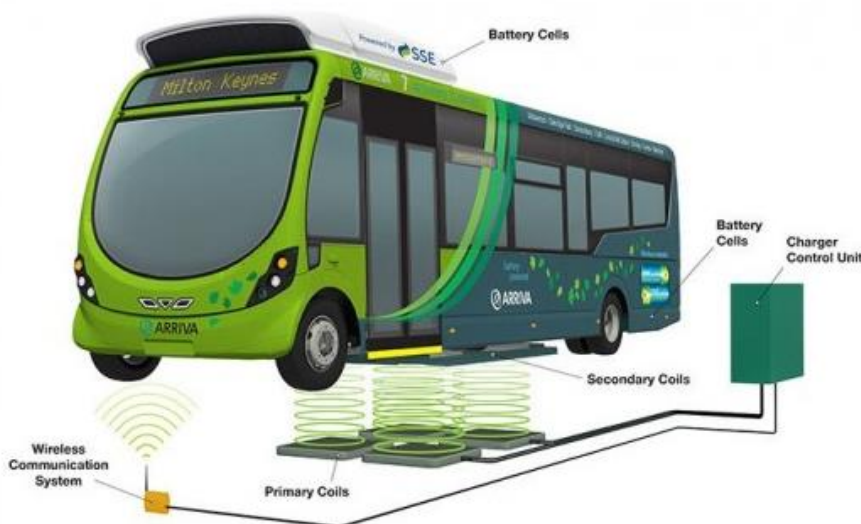


Abbildung 3-8: Aufladung über Onboard-Pantografen (Golem Media GmbH, 2017)

3.2.6 Wartungsaufwand

Bedingt durch den Einsatz von Hochvolttechnik in den Bussen, ist es Werkstattpersonal, welches nicht über eine zusätzliche Qualifikation bzw. Weiterbildung im Bereich der Hochvolttechnik verfügen, nicht möglich alle Wartungs- und Reparaturarbeiten an solch einem Fahrzeug durchzuführen. Aus diesem Grund muss beim Einsatz von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen, auch bei Hybridbussen, ausreichend entsprechendes Personal vorgehalten und geschult werden. Für die Schulung des Personals muss ebenfalls mit zusätzlichen Kosten gerechnet werden. Auch eine Umrüstung der Werkstatt und des Betriebsablaufs ist erforderlich (z.B. Arbeitsstand für Arbeiten am Dach der Busse, isoliertes Werkzeug und Schuhe, Sicherheitsausrüstung etc.).

3.2.7 Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit von Elektrobussen entspricht in etwa der von Hybridbussen. (BMVI, 2015) weist zwar Werte von unter 70% auf, dies ist jedoch insbesondere der geringen Busanzahl, die betrachtet wurde, geschuldet. Hier fallen Einmaleffekte stärker ins Gewicht. Generell ist im Bereich der Elektrobusse aber eine gute Lernkurve zu verzeichnen, so dass die Verfügbarkeit weiter steigt. (BMVI, 2015)

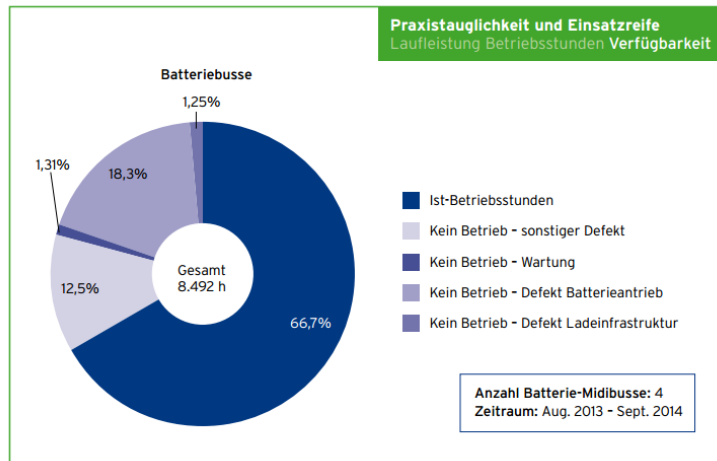


Abbildung 3-9: Verfügbarkeit Elektrobusse (BMVI, 2015)

3.2.8 Marktrecherche

Die in der folgenden Tabelle aufgelisteten Elektrobusse wurden anhand der Marktanalyse ermittelt.

Tabelle 3-1: Überblick Marktanalyse Elektrobusse - SOLO

Nr.	Foto	Hersteller	Bezeichnung	Herkunft	Leistung [kW] Kapazität [kWh]	Reichweite [km]	Länge [m]	Breite [m]	Anzahl Sitzplätze	Anzahl Stehplätze	Quellen/ Link
E S1		Sileo	S12	Deutschland	2 x 120 kW 230 kWh Ladezeit: 2-7 h	>230	12	2,55	41	38	(Sileo, 2017)
E S2		EBE	BlueCityBus	Deutschland	2 x 113 kW 265 kWh	220-230	12,05	2,55	30	45	(EBE-Bus, 2017)
E S3		Ebusco	Ebusco 01.B	Niederlande	270 kW / 123 kW (Max/Nenn) 311 kWh	>220	12	2,54	k.A.	k.A.	(Ebusco, kein Datum)
E S4		BYD	B9	China	2 x 90 kW 324 kWh	>250	12	2,55	k.A.	k.A.	(BYD, 2017)
E S5		VDL	Citea Electric	Niederlande	2 x 99 kW 84 kWh	k.A.	12	k.A.	28-31	k.A.	(VDL, Citea, 2017)

Nr.	Foto	Hersteller	Bezeichnung	Herkunft	Leistung [kW] Kapazität [kWh]	Reichweite [km]	Länge [m]	Breite [m]	Anzahl Sitzplätze	Anzahl Stehplätze	Quellen/ Link
E S6		Bluebus	Bluebus 12 m	Frankreich	8*30 kW = 240 kWh	180-250 km	12	2,55	91-101		(Bluebus, 2017)
E S7		Solaris	Urbino 12 electric	Polen	160 kW Batterieauslegung abhängig von Ausstattung	k.A.	12	2,55	85		(Solaris, Urbino 12 electric, 2017)

Tabelle 3-2: Marktrecherche Elektrobusse - MIDI

Nr.	Foto	Hersteller	Bezeichnung	Herkunft	Leistung [kW] Kapazität [kWh]	Reichweite [km]	Länge [m]	Breite [m]	Anzahl Sitzplätze	Anzahl Stehplätze	Quellen/ Link
E M1		Sileo	S10	Deutschland	2x120 kW 200 kWh Ladezeit: 2-7 h	>200 km	10,7	2,55	25-32	46-65	(Sileo, 2017)
E M2		Solaris	Urbino 8,9 electric	Polen	120 kW Batterieauslegung abhängig von Ausstattung	k.A.	8,9	2,4	21-29	k.A.	(Solaris, Urbino 8.9 LE electric, 2017)

3.3 Hybridantrieb

Gerade bei Linienbussen, die im Stadtverkehr im stop-and-go-Betrieb (etwa zwei bis drei Haltestellen auf einen Kilometer) unterwegs sind, kann der Hybridantrieb eine sinnvolle Alternative zum Dieselbus sein und bis zu 25 % des Kraftstoffverbrauchs einsparen. Hierdurch können die CO₂e-Emissionen sowie die Luftschadstoffemissionen reduziert werden.

3.3.1 Technik

Bei den hier beschriebenen Linienbussen mit Hybridantrieb kommt als Energiewandler ein konventioneller Dieselmotor in Verbindung mit einem Elektromotor zum Einsatz. Das Energiespeichersystem besteht aus einem Kraftstofftank und einer Batterie. Die Kombination der beiden Antriebssysteme hat das Ziel, die individuellen Defizite der Einzelsysteme zu kompensieren und so den Energieverbrauch und die entstehenden Emissionen zu reduzieren.

Beim Hybridantrieb ist zwischen folgenden Konzepten zu unterscheiden: (BMVI, 2015), (Umweltbundesamt, 2014)

- **Parallel-Hybrid:** Verbrennungsmotor und Elektromotor wirken beide auf die Antriebsachse. Der Elektromotor kann damit - zumindest temporär - den Antrieb des Fahrzeugs, unabhängig vom Verbrennungsmotor, übernehmen. Der rein elektrische Fahrbetrieb ist meist auf bestimmte Fahrzustände, wie z.B. das Anfahren, beschränkt. Auch ist die Höchstgeschwindigkeit im Elektroantrieb reduziert. Der verbleibende Anteil der Antriebsenergie wird mechanisch direkt vom Dieselmotor erzeugt.
- **Seriell-Hybrid:** Hier besteht keine mechanische Verbindung vom Verbrennungsmotor auf die Antriebsachse. Die Energie wird ausschließlich elektrisch auf die Achse übertragen. Der Dieselmotor wird allerdings meist in einem optimalen Drehzahlbereich betrieben und speist in die Batterie ein. Hier bestimmt die Größe des Energiespeichers maßgeblich die Reichweite des Busses.

Generell ist damit beim Seriell-Hybrid von einem höheren Anteil des Elektromotors auszugehen. Der elektrische Fahrbetrieb ist aber nur dann anzustreben, wenn die elektrische Energie durch die Rekuperation beim Bremsen gewonnen wurde und nicht durch den Verbrennungsmotor, da hier hohe Wandlungsverluste zu verzeichnen sind. Besonders im Stillstand (z.B. Bedienung der Haltestellen) ist der Einsatz des Elektromotors sinnvoll, auch in Hinsicht auf die Geräuschemissionen.



Abbildung 3-10: Volvo Hybrid Bus (Volvo, 2017)

Nachteilig wirken sich die zusätzlichen Komponenten des Hybridantriebs auf das **Gewicht** des Fahrzeugs aus. Diese werden vorzugsweise auf dem Dach des Busses untergebracht, was die Folge hat, dass dieses verstärkt werden muss. Zudem muss die Fahrdynamik des Busses dem erhöhten Schwerpunkt angepasst werden.

Aufgrund der geringeren Antriebsverluste (Abwärme) des Hybridsystems gegenüber einem Dieselantrieb, ist es bei niedrigen Temperaturen notwendig, dem Fahrgastraum zusätzlich mit Wärme zu versorgen. Die dazu aufzuwendende Energie für die **Heizung** mindert an kalten Tagen den Effizienzvorteil des Hybridbusses gegenüber dem Dieselbus (newsTix, 2011).

3.3.2 Kraftstoffverbrauch / Energieeinsatz

Die Einsparung an Kraftstoff gegenüber konventionellen Dieselbussen liegt zwischen ca. 7% und 25%. Gründe für die relativen hohen Differenzen liegen beispielsweise in der Routenauswahl, dem Fahrverhalten, der Nebenaggregate oder auch noch offenen Effizienzpotenzialen. (BMVI, 2015) Die Reichweite von Hybridbussen ist vergleichbar mit der von Dieselbussen.

3.3.3 Emissionen

Aufgrund des Anteils an Energie, die über den Elektromotor zur Verfügung gestellt wird, reduzieren sich die Emissionen im Vergleich zum reinen Dieselmotor (vgl. Kap.3.2.3). Verringerungen von bis über 30% sind hier möglich, je nach Betriebsweise. Auch bei den Stickstoffemissionen sind deutliche Vorteile bei den Emissionen gegeben im Vergleich zu der üblicherweise in Deutschland eingesetzten Flotte. Auch die Geräuschemissionen sind etwa einem Drittel deutlich gemindert, sogar unabhängig vom Betriebsmodus. (BMVI, 2015)

3.3.4 Investition und Wirtschaftlichkeit

Aufgrund der erst geringen Erfahrungswerte und der in der Entwicklung befindlichen Technologie sind Investition und Wirtschaftlichkeit im Bereich der Hybridbusse derzeit noch schwer zu bewerten. Investitionskosten für einen Solo-Bus liegen bei etwa 320.000 €.

Die Gesamtkosten für Hybrid-Solobusse liegen bei etwa 1,4 €/km (inkl. Versorgung, Kapitalkosten, Instandhaltung und Verbrauch). Im Vergleich zum Dieselantrieb ergeben sich etwa 15-20 Ct/km höhere Gesamtlebenskosten (Mehrkosten von etwa 12-19%). Höhere Instandhaltung und Kapitalkosten können die Kraftstoffeinsparung derzeit ohne eine Förderung noch nicht aufwiegen. Aufgrund einer angenommenen Entwicklung hinsichtlich der Anschaffungskosten, Kraftstoffeinsparung und Dieselpreise wird ein Kostenäquivalent mit Dieseln in etwa zum Ende des Jahrzehnts erreicht (ohne Förderung). (BMVI, 2015)

3.3.5 Infrastruktur

Aufgrund der vergleichbaren Komponenten vgl. Kap. 3.2.5.

3.3.6 Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit der Hybridtechnologie liegt bei etwa 80% bis 90%. Der Wartungsaufwand ist mit dem konventioneller Dieseln vergleichbar. (BMVI, 2015) Hier ist auch bei der Einführung der Technologie ein erhöhter Aufwand für Schulungen und Weiterbildung der Mitarbeiter einzuplanen, beispielsweise für den Umgang mit Hochvoltssystemen. Auch eine Umrüstung der Werkstatt und des Betriebsablaufs ist erforderlich (z.B. Arbeitsstand für Arbeiten am Dach der Busse, isoliertes Werkzeug und Schuhe, Sicherheitsausrüstung etc.).

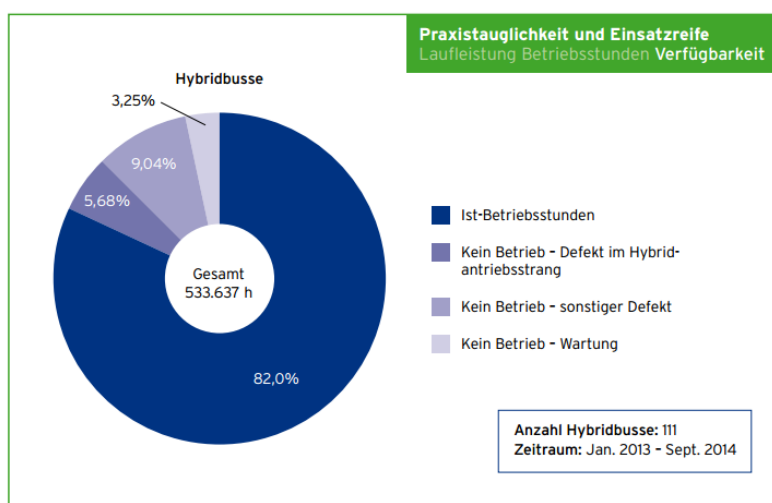


Abbildung 3-11: Verfügbarkeit Hybridbusse (BMVI, 2015)

3.3.7 Marktrecherche

Im Zuge der Marktanalyse konnten die in der folgenden Tabelle dargestellten Hybridbusse identifiziert werden.

Tabelle 3-3: Marktrecherche Hybridbusse - SOLO

Nr.	Foto	Hersteller	Bezeichnung	Herkunft	Hybridsystem	Länge [m]	Breite [m]	Anzahl Sitzplätze	Anzahl Stehplätze	Quellen/ Link
H S1		Solaris	Urbino 12 Hybrid	Polen	Typ: seriell, Traktionsmotor mit 120 kW Dauerleistung, 145 kW Generator, Energiespeichersystem	12	2,55	max. 37 + 1 (abhängig von Ausstattung)	k.A.	(Solaris, 2017)
H S2		MAN	Lion's City Hybrid	Deutschland	Typ: Dieselmotor 250 PS Synchrongenerator: 150 kW Asynchronmotoren: 2 x 75 kW Ultracap-Speicher 200 kW	12	k.A.	36	62	(MAN Hybrid, 2016)
H S3		Volvo	Volvo 7900 H 4x2	Schweden	Typ: Parallel Dieselmotor 177 kW Generator: 120 kW Lithium-Ionen-Akku	12,1	2,55	32	69	(Volvo, 2017) (Omnibusrevue, Buskatalog Volvo 7900 Solo, 2017)
H S4		Van Hool	A300 Hyb	Belgien	k.A.	11,54	k.A.	35	k.A.	(Van Hool, 2017)

Nr.	Foto	Hersteller	Bezeichnung	Herkunft	Hybridsystem	Länge [m]	Breite [m]	Anzahl Sitzplätze	Anzahl Stehplätze	Quellen/ Link
H S5		VDL	Citea SLF-120 Hybrid	Niederlande	Typ: seriell Dieselmotor 152 kW Generator: 200 kW SuperCap	12	k.A.	29+2+1	51	(VDL, Citea-SLF-120-hybrid, 2017) (Omnibusarchiv, 2017)
H S6		IVECO	CITELIS 12 HYBRID	Italien	Typ: seriell, Elektromotor: 175 kW 140 kW Generator, Batterie Lithium-Ionen Nano Phosphat: 11 kWh	12	k.A.	k.A.	k.A.	(Iveco, Iveco Citelis Hybrid Broschüre, 2017)

Tabelle 3-4: Marktrecherche Hybridbusse - MIDI

Nr.	Foto	Hersteller	Bezeichnung	Herkunft	Hybridsystem	Länge [m]	Breite [m]	Anzahl Sitzplätze	Anzahl Stehplätze	Quellen/ Link
H M1		Volvo	7900 H 4x2	Schweden	Typ: Parallel Dieselmotor 177 kW Generator: 120 kW Lithium-Ionen-Akku	10,6	k.A.	32	38	(Omnibusrevue, Buskatalog Volvo 7900 Midi, 2016)
H M2		Van Hool	A308 Hyb	Belgien		8,95	k.A.	17	k.A.	(Van Hool, 2017)

3.4 Erdgasantrieb (CNG)

3.4.1 Technik

Seit einigen Jahren kommt Erdgas vermehrt als Kraftstoff für den Fahrzeugantrieb zum Einsatz. Erdgas besteht zu 85 % bis 95 % aus Methan (CH_4) und besitzt hervorragende verbrennungstechnische Eigenschaften. Jedoch ist die Dichte von Erdgas wesentlich geringer als die Dichte des konventionellen Dieselmotors. Bei Raumtemperatur weist ein Kubikmeter Erdgas einen Heizwert von 35,9 MJ auf. Dies entspricht in etwa dem Heizwert von einem Liter Diesel. Um Erdgas als Kraftstoff einsetzen zu können, muss das Volumen des Gases verringert werden. Hierfür wird Erdgas bei weiterhin niedriger Dichte auf 200 bar in Drucktanks gepresst. Bei diesem Verfahren wird das eingesetzte Erdgas als CNG (Compressed Natural Gas) bezeichnet.



Abbildung 3-12: Erdgasmotor, Abgasanlage und Tankinstrumentarium (Blickpunkt, 2016)



Abbildung 3-13: Gasdruckbehälter auf Busdach (MAN, 2017)

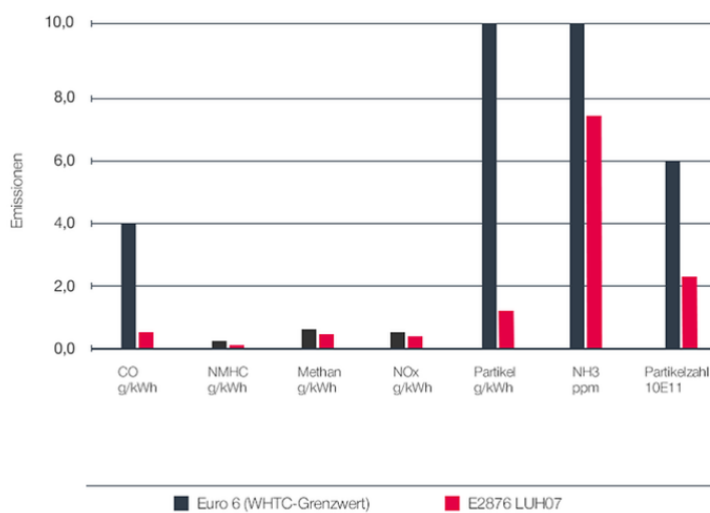
Stadtbusse mit Gasantrieb unterscheiden sich rein äußerlich kaum von Dieselfahrzeugen. Lediglich durch einen aerodynamischen Aufbau auf dem Dach ist eine Abweichung zu erkennen. Unter diesem Aufbau befindet sich das Speichersystem (Drucktanks), in dem das CNG mitgeführt wird. Im Fahrgastraum entstehen damit keine Platzverluste für die Passagiere. Zudem ermöglicht die Unterbringung auf dem Dach die Installation eines größeren Tankvolumens, wodurch die Reichweite erhöht wird. Durch den modularen Aufbau sind Reichweiten von bis zu 500 km möglich (MAN, 2017). Die Motorentechnik basiert bei Erdgasmotoren auf dem Otto-Motor und ist mit einem benzinbetriebenen Motor vergleichbar.

3.4.2 Kraftstoffverbrauch / Energieeinsatz

Je nach Einsatzart weisen Stadtbusse, die Erdgas als Kraftstoff verwenden, einen Mehrverbrauch von 22 % bis 35 % auf, was unter anderem durch den auf die Technologie des Otto-Motors zurück zu führen ist.

3.4.3 Emissionen

Durch den Einsatz von Erdgas, an Stelle von Diesel als Kraftstoff, entstehen etwa 13 % weniger CO₂-Emissionen. Positiv ist zu bewerten, dass bei niedrigen Drehzahlen und hohen Drehmomenten keine Rußemissionen und zudem weniger Geräuschemissionen entstehen (Umweltbundesamt, 2014).



WHTC = World-wide Harmonised Transient Cycle
Wichtung: 14% kalt + 86% warm
Prüfgas: G25, Emissionwerte inklusive Verschlechterungsfaktoren

Abbildung 3-14: Emissionen im Vergleich (MAN, 2017)

3.4.4 Investition und Wirtschaftlichkeit

Investitionskosten für einen Solo-Bus mit Erdgasantrieb liegen bei etwa 290.000 €. Der Wartungsaufwand ist geringfügig höher als bei konventionellen Dieselnissen. (Erdgas mobil, 2013)

3.4.5 Infrastruktur

In der Stadt Ingelheim wird von der Rhein Hessischen eine Erdgastankstelle für PKW betrieben. Bedingt durch die größere Menge an Erdgas, welche die Busse auf einmal Tanken können, ist der Einsatz einer normalen Erdgastankstelle für PKW nicht möglich bzw. durch die deutlich höheren Betankungszeiten nicht zu empfehlen. Auch sind die örtlichen Gegebenheiten am Standort der Tankstelle nicht geeignet, die bestehende Tankstelle für die Ertüchtigung bzw. den Umbau für die Busbetankung zu realisieren. Für die Errichtung einer neuen, leistungsfähigen Busbetankungsanlage müssen mit Investitionskosten in der Größenordnung von rund 400.000 € gerechnet werden. Bei diesen Kosten sind alle Komponenten, Inbetriebnahme und Genehmigungen, allerdings nicht das Gelände inbegriffen. Die Investition in eine Tankstelle rechnet sich allerdings erst ab einer Flotte von mindestens 10 Bussen. Als Alternative ist der Einsatz einer gebrauchten Anlage denkbar. Zurzeit sind solche Anlagen auf dem Markt zu finden und in der Investition günstiger als eine neue Anlage (Schaarschmidt, 2017). Eine solche Anlage errichtet in der Regel der Energieversorger (EVM), welcher auch das Erdgasnetz vor Ort betreibt. Hier ist es allerdings fraglich, ob das örtliche EVM in eine zweite, nur für die Betankung für Busse ausgelegte Erdgastankstelle errichten würde.

3.4.6 Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit von Erdgasbussen ist vergleichbar mit der von Dieselnissen, so dass hier keine Einbußen erfolgen. Nachfolgend wird von einem Wert von 94% ausgegangen.

3.4.7 Marktrecherche

In der folgenden Tabelle sind die Erdgasbusse aufgeführt, welche im Rahmen der Marktanalyse identifiziert wurden.

Tabelle 3-5: Marktrecherche CNG - SOLO

Nr.	Foto	Hersteller	Bezeichnung	Herkunft	Leistung [kW]	Treibstoffsystem	Länge [m]	Breite [m]	Anzahl Sitzplätze	Anzahl Stehplätze	Quellen/ Link
CNG S1		Iveco	CITELIS 12 CNG	Italien	213	k.A.	11,99	2,5	max. 37	23-28	(Iveco, Urbanway, 2017)
CNG S2		MAN	Lion's City CNG	Deutschland	200 und 228	Bis zu 10 Gasflaschen mit Tankinhalt von 188 kg CNG (optional bis 247 kg)	11,98	2,5	37-45	46-58	(Zukunft Erdgas, 2017)_(MAN Lion's City, 2016)
CNG S3		Mercedes-Benz	Citaro NGT	Deutschland	222	Gastank aus Verbundwerkstoff 4 bis 6 x 227 l	12,135	2,55	26-29	67-70	(Mercedes Benz, 2017) (Busplaner, 2017) (Blickpunkt, 2016)
CNG S4		Scania	Citywide LE/LF	Schweden	250	bis 920 kg	12	k.A.	k.A.	k.A.	(Zukunft ERDGAS, 2017) (VSG, 2017)

Nr.	Foto	Hersteller	Bezeichnung	Herkunft	Leistung [kW]	Treibstoffsystem	Länge [m]	Breite [m]	Anzahl Sitzplätze	Anzahl Stehplätze	Quellen/ Link
CNG S5		Solaris	Urbino 12 CNG	Polen	239	Standard: Gastank aus Verbundwerkstoff 4 x 315 l Option: Gastank aus Verbundwerkstoff 5 x 315 l oder 5 x 340 l	12	k.A.		max. 37 + 1 (abhängig von Ausstattung)	(Omnibusrevue, Solaris Urbino, 2017)
CNG S6		Van Hool	A330 CNG	Belgien	k.A.	k.A.	12	2,55	35	k.A.	(Van Hool, 2017)

Tabelle 3-6: Marktrecherche CNG - MIDI

Nr.	Foto	Hersteller	Bezeichnung	Herkunft	Länge [m]	Breite [m]	Leistung [kW]	Treibstoffsystem	Anzahl Sitzplätze	Anzahl Stehplätze	Quellen/ Link
CNG -M1		Iveco	CITELIS 10,5 CNG	Italien	10,46	2,5	213		max. 28	23-28	(Iveco, Urbanway, 2017) (Iveco, CITELIS, 2017)

3.5 Wasserstoff

3.5.1 Technik

Wasserstoff kann wie auch CNG in einem umgebauten Verbrennungsmotor genutzt werden, dem sogenannten Wasserstoffverbrennungsmotor. Bei diesem Motorkonzept wird die Antriebsenergie wie bei allen anderen Verbrennungsmotoren mechanisch über die Kurbelwelle und das Getriebe auf die Antriebswelle und Räder übertragen. Aufgrund der höheren Wirkungsgrade wird jedoch in Fahrzeugen die Brennstoffzelle (BZ) als Antriebssystem bevorzugt eingesetzt. Hierbei wird in der Brennstoffzelle aus dem Energieträger Wasserstoff elektrische Energie erzeugt. Angetrieben wird das Fahrzeug über einen Elektromotor (Helsper, 2014). Hierdurch besitzt der BZ-Antrieb dieselben Vorteile gegenüber einem Dieselbus wie ein batterieelektrischer Antrieb.

Darüber hinaus besitzen BZ-Fahrzeuge Vorteile gegenüber rein batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen, nämlich eine deutlich größere Reichweite und ähnlich kurze Tankzeiten wie Dieselfahrzeuge (MUKE, 2012). Des Weiteren fällt beim Betrieb einer BZ auch Abwärme auf einem hohen Temperaturniveau an, welche für die Temperierung des Fahrgastraums in den Wintermonaten zur Verfügung steht (Grüne, 1999).

Im Vergleich zu den anderen alternativen Antriebstechniken ist der BZ-Antrieb noch nicht so weit entwickelt. Zudem entstehen bei der Herstellung der BZ-Stacks, auf Grund des hohen Anteils von Handarbeit und bei der Erzeugung des Wasserstoffs hohe Kosten (Energieportal, op).

3.5.2 Emissionen

Bei der Nutzung von Wasserstoff in einer BZ entstehen keine direkten THG- und Luftschadstoffemissionen. Zudem ist eine fast emissionsfreie Mobilität möglich, wenn die benötigte elektrische Energie für die Herstellung des Wasserstoffs (Elektrolyse von Wasser) aus Erneuerbaren Energien stammt.

3.5.3 Infrastruktur

Im Rahmen von H2 MOBILITY Deutschland ist eine flächendeckende, öffentlich nutzbare Infrastruktur für die Wasserstoffmobilität in Deutschland geplant. Die Roadmap sieht vor, die ersten 100 Wasserstoffstationen bis 2018 bedingungslos und unabhängig von Fahrzeugzahlen zu errichten. Ziel sind bis zu 10 Stationen in den sechs deutschen Ballungszentren Hamburg, Berlin, Rhein-Ruhr, Frankfurt, Stuttgart und München sowie Wasserstoff-Korridore entlang von Autobahnen. Die zweite Projektphase orientiert sich an den Zulassungszahlen von Brennstoffzellenfahrzeugen. 400 Wasserstofftankstellen sollen bis 2023 eine flächendeckende Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland möglich machen. Die H2 MOBILITY übernimmt für die bis zu 400 Wasserstofftankstellen alle operativen Aufgaben, darunter Netzplanung, Genehmigung, Beschaffung, Errichtung und Betrieb der Wasserstoffstationen, inkl. Bezahlssystem und Wissensma-

nagement sowie das H₂-Sourcing, das einen möglichst hohen Anteil des Energieträgers Wasserstoff aus regenerativen Ressourcen beziehen soll. (NOW, 2017)

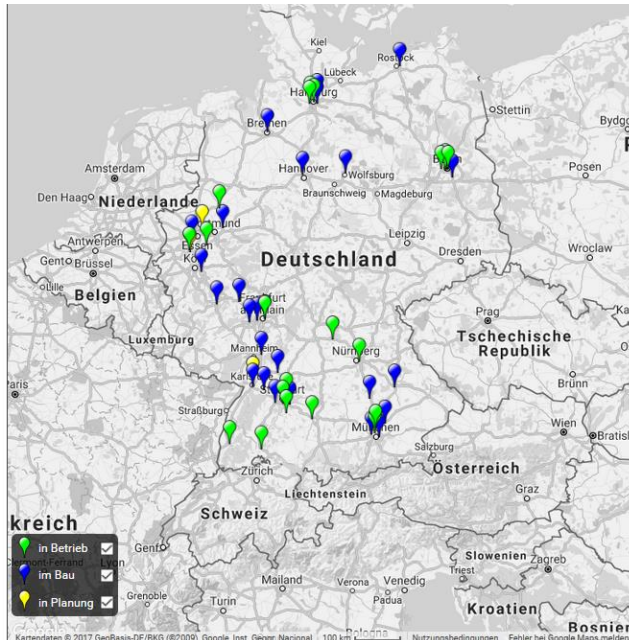


Abbildung 3-15: Wasserstoff-Tankstellen (NOW, 2017)

Im Rahmen des ÖPNV-Projekts „H₂Bus Rhein-Main“ (s.u.) ist auch die Errichtung einer Tankstelle sowie Werkstatt für H₂-Brennstoffzellen Busse im Raum Mainz/Wiesbaden geplant.

Bei dem möglichen Einsatz von Wasserstoffbrennstoffzellenbussen für Ingelheim sollte hierbei eine enge Zusammenarbeit mit den Verkehrsbetrieben in Mainz/Wiesbaden stattfinden, um die vorhandene bzw. geplante Infrastruktur und Logistik gemeinschaftlich zu nutzen und hierdurch auch stärker auslasten zu können.

3.5.4 Investition und Wirtschaftlichkeit

Die Investition in einen Solobus liegt zurzeit bei über 1 Mio. €. Allerdings versprechen sich die politischen Vertreter durch das bereits gestartete EU-Gemeinschaftsprojekt JIVE eine Reduzierung der Stückkosten im Bereich der Fahrzeuge und Infrastruktur. Innerhalb dieses Förderprogrammes sollen EU weit rund 140 BZ-H₂-Busse gefördert werden. Ebenfalls soll, durch das begleitende Projekt MEHRLIN, der Bau von sieben Wasserstoff-Tankstellen für Busse gefördert werden. Die H₂-Busse werden in Deutschland (Kölner Umland, Wuppertal und Rhein-Main-Gebiet), Großbritannien (London, Birmingham, Dundee und Aberdeen), Italien (Südtirol), Lettland (Riga) sowie in Dänemark (Slagelse) zum Einsatz kommen.

3.5.5 Marktrecherche

Die Technik befindet sich derzeit noch in der Erprobung (BMVI, 2015) und wird zurzeit in Pilotprojekten in Köln (18 m Bus) oder Hamburg eingesetzt.

Beispielsweise ist im Rahmen des ÖPNV-Projekts „H2Bus Rhein-Main“ neben der Anschaffung von elf Brennstoffzellen-Bussen die Errichtung einer Wasserstoff-Tankstelle sowie eines technischen Kompetenzzentrums inklusive Buswerkstatt geplant. Das Projekt soll in 2017 starten, die ersten Busse sowie die Tankstelle in 2018 in Betrieb gehen. (MVG, 2016) 100 Brennstoffzellen-Busse sollen über eine Ausschreibung des FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, <http://www.fch.europa.eu>) in mehreren Städten in Betrieb gehen. Randbedingung ist hier ein maximaler Preis von 625.000 € pro Bus.

In der folgenden Tabelle werden die über die Marktanalyse erfassten Stadtbusse mit BZ-Antrieb aufgeführt.

Tabelle 3-7: Marktrecherche H2-BZ - SOLO

Nr.	Foto	Hersteller	Bezeichnung	Herkunft	Länge [m]	Breite [m]	Leistung [kW]	Reichweite [km]	Anzahl Sitzplätze	Anzahl Stehplätze	Quellen/ Link
BZ S1		Solaris			12						
BZ S2		Van Hool	A300L fuel cell	Belgien	12,36				28		

Weitere Brennstoffzellenbusse von VDL oder Daimler befinden sich in der Entwicklung und sind noch nicht serienreif. Hier ist in den nächsten Jahren mit einer Marktverfügbarkeit zu rechnen.

4 Überblick Vorauswahl Busse / Beschreibung der Varianten

Nachfolgend werden die Anforderungsdaten aus Kap. 2 den am Markt verfügbaren Antriebskonzepten gegenüber gestellt. Hierbei erfolgt eine Aufteilung auf SOLO- und MIDI-Busse. Es werden die Eignung von Elektro-, Hybrid- und Erdgasbussen für die einzelnen Linien grob bewertet und damit die Varianten für die Detailbetrachtung festgelegt.

Stadtbusse mit Brennstoffzellen finden bei den weiteren Untersuchungen keine Berücksichtigung, da sich diese Technik noch im Erprobung- und Entwicklungsstadium befindet. Hierzu gibt es am Markt zwar bereits SOLO-Busse, diese sind allerdings in der Anschaffung sowie im Betrieb noch nicht wirtschaftlich darstellbar. Auch ist die Versorgung und Betankung mit Wasserstoff teilweise noch problematisch und kostenintensiv. Weiterhin ist eine aufwendige Infrastruktur notwendig, die derzeit noch nicht existiert bzw. sich erst im Planungsstadium befindet.

Aufgrund der Verfügbarkeit, der Abmessungen (Länge u. Breite), der Anzahl Sitz- und Stehplätze sowie der Reichweite wurde eine Vorauswahl getroffen. Prinzipiell gibt es für jede Antriebstechnik Solo- und Midibusse, wobei die Auswahl bei den Midibussen geringer ist.

Im Rahmen der Studie kann keine Einsatzplanung der Busse erfolgen. Es wird davon ausgegangen, dass die Busse durchgewechselt werden, so dass eine in etwa gleiche Auslastung erfolgen kann. Bei der nachfolgend beschriebenen Mischvariante 1b aus Elektro- und Dieselnissen wird jeweils davon ausgegangen, dass die Elektrobusse maximal gefahren werden bis zu einer Tagesstrecke von ca. 260 km (Solo) bzw. 230 km (Midi) und dass der zusätzliche Dieselniss die restliche Strecke bedient. Die jeweiligen Strecken wurden anhand der Fahrpläne abgeschätzt.

4.1 Linien 611/618/619 (Solo)

Die Vorauswahl ergibt folgende Hersteller für Solo-Busse:

Tabelle 4-1: Vorauswahl mögliche Hersteller SOLO

	Linie 611	Linie 618	Linie 619
Maßgebliche Strecke	399 km/d (Linie 611/618) 399 km/d (Linie 611/619)		
	2 SOLO-Busse	1 SOLO-Bus	1 SOLO-Bus
Fahrplan-km	141.300 km/a	23.200 km/a	22.800 km/a
Betriebszeit	Mo-Sa	Mo-Sa	Mo-Sa
Elektro	BYD, EBE, Ebusco, Sileo, Solaris, VDL		
Hybrid	IVECO, Solaris, MAN, Van Hool, VDL, Volvo		
Erdgas	Iveco, MAN, Mercedes-Benz, Scania, Solaris , Van Hool		

Hybrid- und Erdgasantrieb stellen für die Abdeckung der SOLO-Busse mögliche Alternativen dar. Dabei können die drei Linien mit zwei Bussen abgedeckt werden. Für einen Bus ergibt sich eine Fahrleistung von etwa 400 km/d.

Elektrobusse können die Fahrstrecke von 400 km/d nicht ohne Zwischenladung abdecken. Um mit zwei Bussen die drei Linien bedienen zu können, sind daher Zwischenladungen notwendig. Diese werden für den Busbahnhof eingeplant (Variante 1a).

Alternativ könnten zwei Elektrobusse und ein zusätzlicher Dieselbus die Linien bedienen. Hierbei decken die Elektrobusse den Bereich bis ca. 260 km/d ab, für die restliche Strecke wird der Dieselbus eingesetzt. Da es sich bei letzterer um eine vergleichbar geringe Strecke handelt, wird von einem Dieselantrieb ausgegangen, da dies die wirtschaftlichste Variante darstellt.

Als Varianten werden daher für die Linien 611, 618 und 619 betrachtet:

- Basisvariante: Dieselantrieb (2 Solo)
- Variante 1a: Elektroantrieb mit Zwischenladung (2 Solo)
- Variante 1b: Elektroantrieb ohne Zwischenladung (2 Solo), ein Dieselbus (1 Solo)
- Variante 2: Hybridantrieb (2 Solo)
- Variante 3: Erdgasantrieb (2 Solo)

Die Abdeckung erfolgt bei den Varianten 1a, 2 und 3 über zwei SOLO-Busse, die die Linien 611/618 bzw. 611/619 bedienen. Für die Variante 1b sind 3 Solo-Busse erforderlich.

4.2 Linien 611/612/613/614/618/619 (Midi)

Die Vorauswahl ergibt folgende Hersteller für Midi-Busse:

Tabelle 4-2: Vorauswahl mögliche Hersteller MIDI

	Linie 611	Linie 612	Linie 613	Linie 614	Linie 618	Linie 619
Maßgebliche Strecke [km/d]	204	324	297	468	62	60
Fahrplan-km	10.100 km/a	96.800 km/a	75.000 km/a	140.700 km/a	3.100 km/a	3.000 km/a
Betriebszeit	So/Feiertag	Mo-So	Mo-So	Mo-So	So/Feiertag	So/Feiertag
Elektroantrieb	Sileo, Solaris					
Hybridantrieb	Volvo, Van Hool					
Erdgasantrieb	Iveco					

Ursprünglich wurden vier Midibusse eingeplant. Zur weiteren Berechnung wurden daher die Linien so zusammengelegt, dass die Fahrstrecke relativ ausgeglichen ist. Die Linien werden zusammen betrachtet, so dass Aussagen über die Umstellung aller Linien auf eine alternative Technologie getroffen werden können.

Bei der Variante 1b ist zu beachten, dass 5 Elektrobusse und ein zusätzlicher Dieselbus erforderlich sind. Da die Strecke der Linie 614 von über 400 km/d gut über zwei Elektrobusse abgedeckt werden kann, wurde speziell für diese Linie ein zusätzlicher Elektrobus vorgesehen. Der Zusatzdiesel ist für die anderen Linien erforderlich, da diese teilweise Strecken von über 230 km/d zu bewältigen haben. Es wird davon ausgegangen, dass diese Linien sich einen Dieselbus für die restlichen Strecken teilen (zusätzliche Einsatzplanung erforderlich).

Als Varianten werden daher für die Linien 611 bis 619 betrachtet:

- Basisvariante: Dieselantrieb (4 Midi)
- Variante 1a: Elektroantrieb mit Zwischenladung (4 Midi)
- Variante 1b: Elektroantrieb ohne Zwischenladung (5 Midi), mit Zusatz-Dieselbus (1 Midi)
- Variante 2: Hybridantrieb (4 Midi)
- Variante 3: Erdgasantrieb (4 Midi)

5 Grundlagen, Prämissen und Festlegungen

5.1 Allgemeines

Die Daten zum Verbrauch und den Kosten wurden als typische Werte für die entsprechende Technik und Gegebenheiten einbezogen. Real können sich in der Ausschreibung und im Fahrbetrieb Unterschiede ergeben, die jedoch im Rahmen der Studie nicht abbildbar sind. Soweit keine Werte aus der Literatur oder von Herstellern vorlagen, wurden Abschätzungen getroffen. Soweit keine Quelle angegeben sind, handelt es sich um eigene Berechnungen und Abschätzungen.

Bei den angegebenen Kosten handelt es sich um Werte inkl. Mehrwertsteuer.

Zu berücksichtigen ist bei der Umsetzung, dass ggf. die **baulichen Gegebenheiten** eine Rolle spielen. So ist in Heidesheim eine Unterführung vorhanden (**Heidenfahrtbrücke**), welche eine maximale Durchfahrtshöhe von 3,5 m aufweist. Einige Busse mit alternativem Antrieb weisen eine Höhe von über 3,2 m und höher auf, so dass sie hier nicht eingesetzt werden können. Die Problematik gilt nicht für einzelne Antriebsarten, sondern ist vom jeweiligen Bus abhängig, so dass bei Umsetzung eine Einzelbetrachtung erforderlich ist.

5.2 Reserven und Verfügbarkeit

Die Antriebskonzepte weisen unterschiedliche Verfügbarkeiten auf. Diese schwanken zwischen ca. 88% (Elektro, Hybrid) und 95% (Diesel, Erdgas). Diese Unterschiede sind vergleichbar gering und werden sich mit der Lernkurve der Elektrobusse noch annähern.

Daher wird bei den nachfolgenden Vergleichen davon ausgegangen, dass wie von BPV geplant zwei Solobusse als Reserve vorgehalten werden. Aufgrund der geringen Fahrleistungen wird hier von Dieseln ausgangen. Alternative Antriebe sind hier natürlich prinzipiell einsetzbar, erfordern jedoch hohe Investitionen, die sich aufgrund der geringen Betriebszeit nicht wirtschaftlich darstellen lassen. Da diese Busse bei allen Varianten zur Verfügung stehen müssen, werden sie nachfolgend nicht in die Berechnungen einbezogen.

Da die Verfügbarkeit jedoch auch zu berücksichtigen ist, wird die jährliche Fahrleistung entsprechend auf den alternativen Antrieb (88% - 95%) und die Reserve-Dieselfahrzeuge aufgeteilt. Dabei übernehmen die Dieseln generell, wenn der eigentlich geplante Bus aufgrund von Wartungsarbeiten etc. nicht einsetzbar ist.

5.3 Antriebskonzepte

Für die einzelnen Antriebssysteme wurden folgende Werte berücksichtigt:

5.3.1 Dieselbus

Tabelle 5-1: Kennwerte Dieselbus

	Solobus	Midibus
Emissionen	2.990 gCO ₂ e/l	
Heizwert	9,96 kWh _{Hi} /l	
Verfügbarkeit	94%	94%
Verbrauch Diesel ⁹	42 l/100 km	35 l/100 km
Kosten Diesel	1,1 €/l	1,1 €/l
Kosten für Wartung / Instandsetzung ⁸	0,42 €/km	0,42 €/km
Investition ⁹	240.000 €	200.000 €

5.3.2 Elektrobuss

Ladekonzept: nachfolgend wird von einer konduktiven Nachladung ausgegangen (Nachtauladung im Depot sowie bei Variante 1a mit einer zusätzlichen Zwischenladung über einen Pantographen). Induktion wird aufgrund der nicht vorhandenen Marktreife und den hohen Kosten nicht weiter betrachtet.

Beheizung: Es existieren unterschiedliche Varianten der Beheizung des Busses bei alternativen Antrieben. Aufgrund der vorhandenen Abwärme beim Verbrennungsmotor kann diese zur Beheizung genutzt werden. Dies entfällt beim Elektrobuss, so dass hier entweder eine elektrische Beheizung (zu Lasten der Batterie bzw. der Reichweite der Fahrzeuge) oder ein zusätzliches Diesellaggregat (mit der Folge zusätzlicher Emissionen) zum Einsatz kommen (vgl. Kap. 3.2.2).

Wie die Beheizung erfolgt, ist zwar relevant, wird in der nachfolgenden Betrachtung jedoch nicht im Detail berücksichtigt, da dies nicht ausschlaggebend für die Entscheidung für eine Antriebsart ist.

⁸ Quelle: (Bonhoff, 2015)

⁹ Quelle: (BPV Consult GmbH, 2016)

Emissionen: Bei den CO₂-Emissionen wird davon ausgegangen, dass klimaneutraler Strom der Rhein Hessischen bezogen wird. Hier fallen vor Ort keine CO₂-Emissionen an. (Rhein Hessische, 2017)

Folgende Werte gehen in die nachfolgenden Betrachtungen ein:

Tabelle 5-2: Kennwerte Elektrobus

	Solobus	Midibus
Emissionen	0	
Verfügbarkeit	88%	88%
Verbrauch Strom	110 kWhel/100 km	100 kWhel/100 km
Kosten Strom	0,19 €/kWhel	0,19 €/kWhel
Kosten für Wartung / Instandsetzung	0,36 €/km	0,36 €/km
Investition ¹⁰	583.000 € bzw. 613.000 € ¹¹	570.000 € bzw. 595.000 € ¹¹
Restwert nach 10 Jahren (Ansatz 75%)	145.000 € bzw. 152.000 € ¹¹	141.000 € bzw. 148.000 € ¹¹

5.3.3 Hybridbus

Antrieb: Beim Hybridbus existieren unterschiedliche Antriebskonzepte (vgl. Kap. 3.3). Für die nachfolgenden Betrachtungen wurde davon ausgegangen, dass es sich nicht um eine plug-in-Version handelt, so dass kein zusätzlicher Strombedarf besteht bzw. nur Diesel als Kraftstoff eingesetzt wird. Die betrachteten Busse werden ausschließlich mit Diesel betrieben.

Einsparpotenzial: Die Energieeinsparung beim Hybridbus hängt in großem Maße von der Reisegeschwindigkeit des Busses ab. Geringe Geschwindigkeiten legen viele Bremsvorgänge nahe, sodass hier Bremsenergie elektrisch gespeichert werden kann. Je geringer die durchschnittliche Geschwindigkeit, umso größer die Einsparung. Daher wurden für die Bereiche Solo- und Midibusse die durchschnittliche Einsparung gegenüber reinen Dieselnissen abgeschätzt.

Die gegebenen Linien weisen folgende mittleren Geschwindigkeiten auf:

Tabelle 5-3: Eignung der Strecken für den Hybridbusbetrieb

¹⁰ Quelle: TSB

¹¹ Zusatzkosten bei Zwischenaufladung aufgrund der aufwendigeren Ladetechnik

	Durchschnittliche Geschwindigkeit ¹²	Eignung für Hybrid	Einsparung an Diesel
611	18 km/h	Sehr gut	25%
612	21,5 km/h	Sehr gut	25%
613	19,2 km/h	Sehr gut	25%
614	34,3 km/h	Gering	5%
618	26,4 km/h	Mittel-gering	8%
619	32,3 km/h	Gering	5%

Die durchschnittliche Einsparung (entsprechend der Fahrleistungen) liegt bei allen Midi-Bussen zusammen bei 16%, bei den Solobussen (Linie 611/618/619) können 20% angesetzt werden.

Folgende Werte gehen in die nachfolgenden Betrachtungen ein:

Tabelle 5-4: Kennwerte Hybridbus

	Solobus	Midibus
Emissionen	2.990 gCO ₂ e/l	
Heizwert	9,96 kWh _{Hi} /l	
Verfügbarkeit	88%	88%
Einsparung Diesel gegenüber einem Dieselmussen	20%	16%
Verbrauch Diesel	34 l/100 km	30 l/100 km
Kosten Diesel	1,1 €/km	1,1 €/km
Kosten für Wartung / Instandsetzung ¹³	0,44 €/km	0,44 €/km
Investition ¹⁴	320.000 €	266.000 €

¹² Quelle: (BPV Consult GmbH, 2016)

¹³ Quelle: (Bonhoff, 2015)

¹⁴ Quelle: (Knote, 2015), TSB

5.3.4 Erdgasbus

Ein **Erdgasbus** lässt sich mit konventionellem CNG oder auch Bio-CNG betreiben. Hierfür wird aufgrund der gleichen Technik und Kosten nur eine Variante dargestellt. Die Reduzierung der Emissionen wird jedoch separat dargestellt.

Folgende Werte gehen in die nachfolgenden Betrachtungen ein:

Tabelle 5-5: Kennwerte Erdgasbus

	Solobus	Midibus
Emissionen	CNG: 3.571 gCO ₂ e/kg Bio-CNG: 737 gCO ₂ e/kg	
Heizwert	13,16 kWh _{Hi} /kg	
Verfügbarkeit	94%	94%
Verbrauch CNG	40 kg/100 km	33 kg/100 km
Kosten CNG	1 €/kg	1 €/kg
Kosten für Wartung / Instandsetzung ¹⁵	0,44 €/km	0,44 €/km
Investition ¹⁶	290.000 €	240.000 €

¹⁵ Quelle: (Erdgas mobil, 2013)

¹⁶ Quelle: (Erdgas mobil, 2013), TSB

5.4 Kosten für Infrastruktur

5.4.1 Elektrobus

Die Kosten für die **Stromversorgung** im Depot und am Bahnhof (Zwischenaufladung) werden bei der Ermittlung der Investitionskosten voll angesetzt, da diese nur für die Busse installiert wird. Hierfür liegt ein Angebot der Rheinhessische Energie- und Wasserversorgungs-GmbH vor. Zusätzlich werden Kosten für die Verlegung und vier Pantographen inkl. Ladetechnik berücksichtigt. Drei Pantographen sind mindestens erforderlich, da bis zu drei Busse gleichzeitig am Bahnhof zwischenladen müssen (vgl. Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2). Zur Redundanz wird ein zusätzlicher Pantograph eingeplant, um bei einem Ausfall eines Pantographen den Linienbetrieb weiterhin aufrechterhalten zu können.

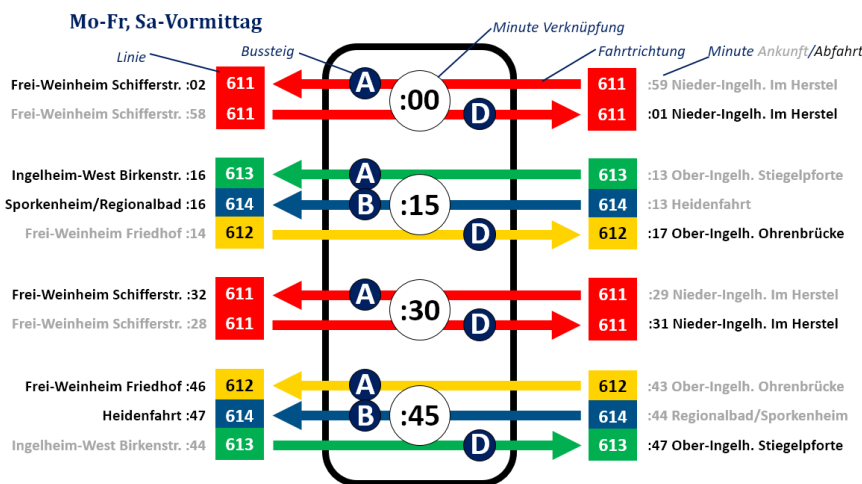


Abbildung 5-1: Verknüpfungssystematik Bahnhof Ingelheim Mo-Fr, Sa-Vormittag [BPV 2016]

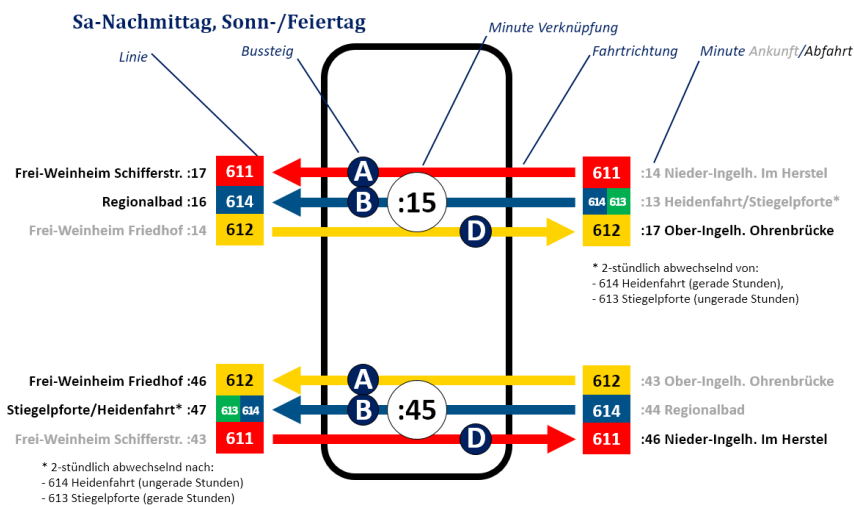


Abbildung 5-2: Verknüpfungssystematik Bahnhof Ingelheim Sa-Nachmittag, Sonn-/Feiertag

Tabelle 5-6: Kosten für Stromversorgung Depot und Bahnhof

	Kosten		Quelle
150 kVA Netzanschlusskosten	37.000 €	zzgl. MwSt.	(Wendling, 2017)
595 kVA Netzanschlusskosten	45.000 €	zzgl. MwSt.	(Wendling, 2017)
Trafostation	57.000 €	zzgl. MwSt.	(Wendling, 2017)
Verlegung Leitungen	15.000 €	zzgl. MwSt.	Annahme TSB pauschal
4 Pantographen inkl. Ladetechnik	600.000 €	zzgl. MwSt.	(Staubach, 2017)
Summe			

Die dargestellten Richtkosten wurden an die erforderlichen Rahmenbedingungen (Leistungsbedarf etc.) angepasst und prozentual den Solo- und Midibussen entsprechend der Ladeleistung zugeschlagen.

Diese Festlegung ist willkürlich und setzt voraus, dass alle Linien mit Elektrobussen betrieben werden. Sollte dies nicht der Fall sein, ändern sich die Kosten bzw. die Aufteilung entsprechend.

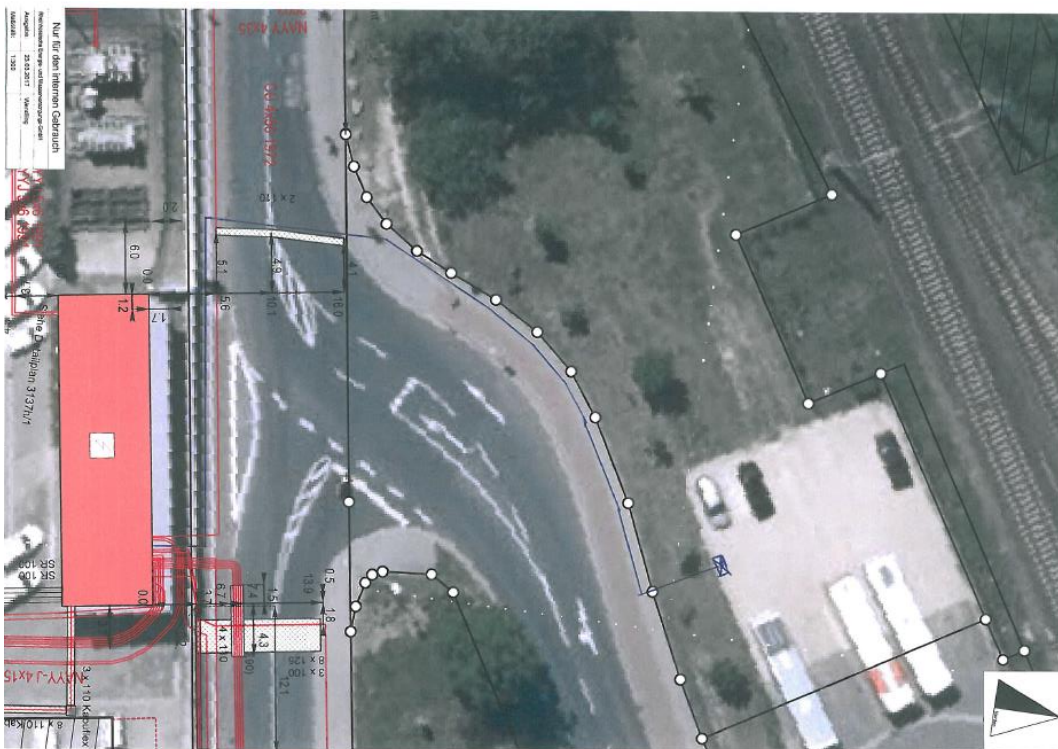


Abbildung 5-3: Busdepot Ingelheim (Wendling, 2017)

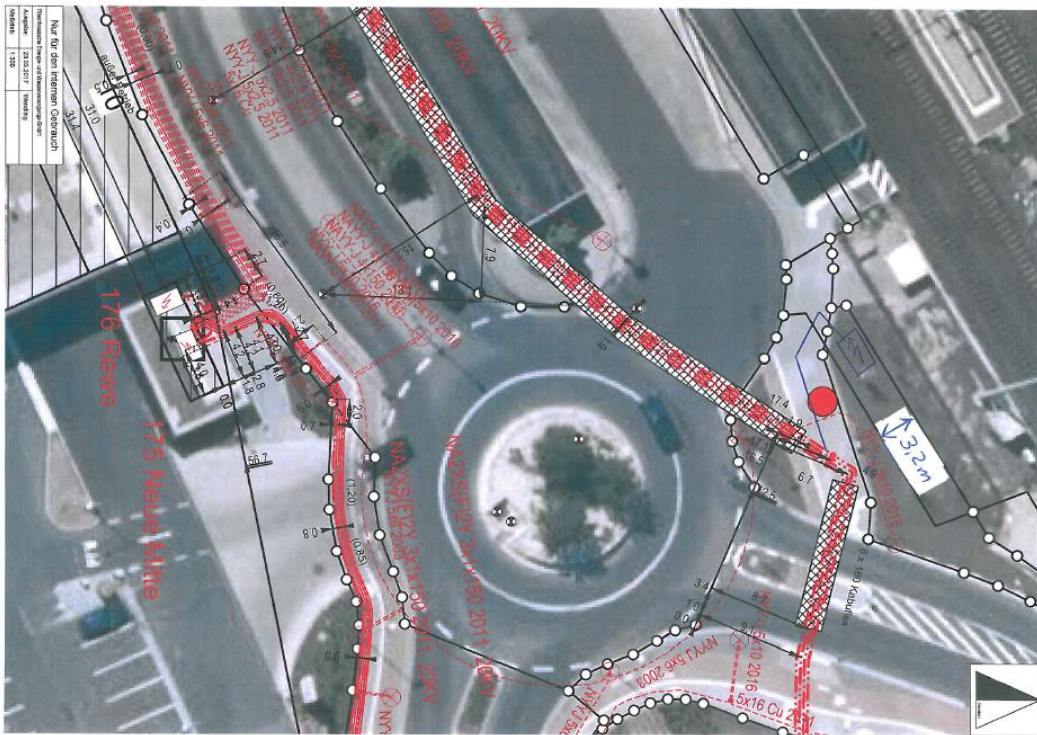


Abbildung 5-4: Busbahnhof Ingelheim (Wendling, 2017)

5.4.2 Erdgasbus

Im Falle der Erdgastankstelle werden die Kosten nicht angesetzt, da die Installation einer eigenen Erdgastankstelle nur für die Busse des ÖPNV Ingelheim aufgrund der hohen Investitionskosten nicht realistisch ist. Der Energieversorger müsste die Tankstelle bauen, ggf. ist ein Zuschuss seitens der Stadt Ingelheim denkbar. Dann besteht jedoch auch für externe Busse/LKW die Möglichkeit, hier zu tanken, so dass die Tankstelle wirtschaftlicher betrieben werden könnte.

Für eine leistungsfähige Betankungsanlage ist mit Kosten in Höhe von etwa 400.000 € (inkl. Genehmigung, Tiefbau, Hardware, Inbetriebnahme) zu rechnen, so dass sich dies in der Regel erst ab etwa 10 Busse lohnt. (Schaarschmidt, 2017)

Da die Variante bereits ohne die Kosten für eine Erdgastankstelle eine relativ schlechte Wirtschaftlichkeit aufweist, würden zusätzliche Kosten für einen Zuschuss diese noch verschlechtern.

5.5 Entwicklung der Kraftstoffpreise

Einen wesentlichen Faktor der Wirtschaftlichkeit stellen die Kraftstoffpreise dar. Diese sind Entwicklungen unterworfen, die nur schwer einschätzbar sind. Studien zu der Thematik wie die Entwicklung sein könnte (Schlesinger, 2014), zeigt folgendes Szenario auf:

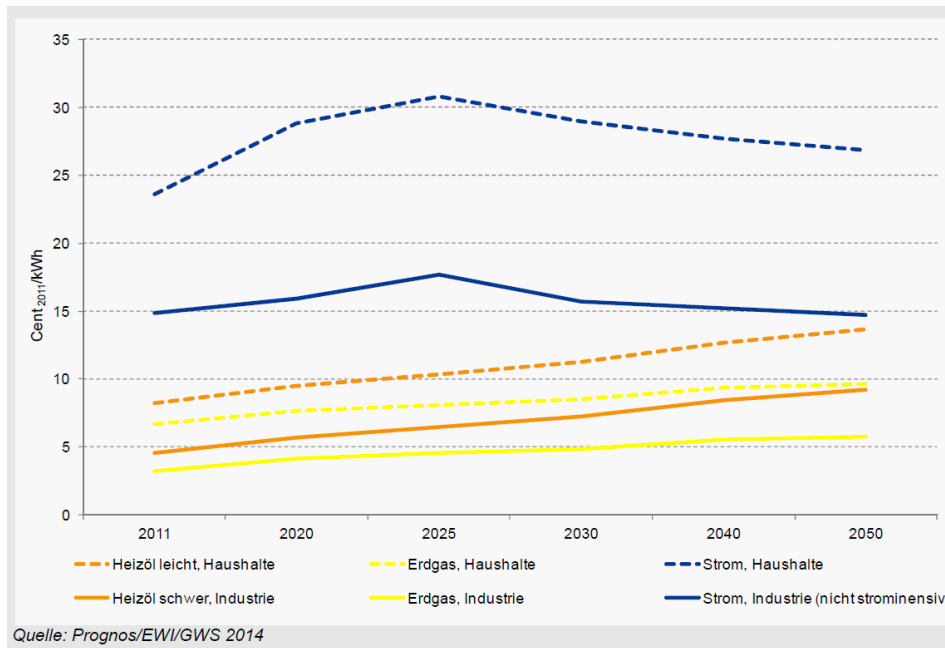


Abbildung 5-5: Entwicklung der Verbraucherpreise für Energieträger (Industriepreise zzgl. MwSt)

Nachfolgend wird in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auch eine Dynamik der Kraftstoffpreise dargestellt. Diese basiert auf steigenden Preisen für Diesel und Erdgas sowie zuerst noch ansteigenden, aber ab ca. 2025 fallenden Preisen bei Strom. Dabei wird von einer jährlichen Steigerung von 3% bei Diesel und Erdgas ausgegangen. Strom wird bis 2025 um ca. 1%/a teurer, danach um 1%/a günstiger.

Aufgrund der Ermäßigung der Energiesteuer im ÖPNV fallen die Energiepreise generell günstiger als für andere Großabnehmer aus. Da die Ermäßigungen jedoch im Vergleich zu den Kraftstoffkosten eher gering sind, werden sie nachfolgend nicht in die Berechnungen einbezogen. Hier erscheint die generelle Betrachtung der Entwicklung der Energiepreise wichtiger, da diese im Größeren Maße Schwankungen unterworfen sind und hierdurch die Energiesteuer eine vernachlässigbare Größe darstellt.

5.6 Fördermöglichkeiten

Die Umsetzung von alternativen Antrieben und insbesondere von Elektrobussen wird seitens des Bundes unterstützt. Folgende Förderprogramme der verschiedenen Ministerien bestehen bzw. sind in Planung:

5.6.1 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)

BMUB-Förderprogramm für Hybridbusse: Das BMUB fördert seit 2015 die Beschaffung und Inbetriebnahme von dieselelektrischen Hybridbussen und Plug-In-Hybridbussen im öffentlichen Nahverkehr (es sind mindestens drei Busse erforderlich). Die maximale Beihilfeintensität liegt bei 35% der förderfähigen Investitionsmehrkosten (Solobusse maximal Mehrkosten von 100.000 €, für Midibusse gibt es bisher keine Förderungen.). Dieses Förderprogramm soll zum 31.12.2017 auslaufen, allerdings gibt es Planungen, die Förderung auch im Jahr 2018 weiter bestehen zu lassen und um batterieelektrische Busse zu erweitern. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015)

BMUB-Förderprogramm für Elektrobuse: Das BMUB will künftig die Anschaffung und den Einsatz von Elektrobussen im ÖPNV fördern. Hierzu wird das Anschaffungsprogramm für Hybrid- und Plug-In-Hybridbusse auf Elektrobuse ausgeweitet. Die Förderrichtlinie hierzu wird derzeit erarbeitet und soll in Kürze veröffentlicht werden. Das Programm soll zum 01.01.2018 starten, die Förderung soll 80 % der Mehrkosten als Investitionszuschuss betragen. Dieser soll für die Umstellung ganzer Linien ab sechs Bussen gelten. Bisher hat das BMUB zwei Projekte (Hamburg und Hannover) im Bereich der Elektrobuse gefördert. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2017)

5.6.2 Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)

Das BMVI fördert seit dem 09.06.2015 die Anschaffung von batterieelektrisch angetriebenen Bussen, allerdings sollen es mindestens fünf E-Busse pro Antrag sein. Die Förderung umfasst einen Investitionszuschuss in Höhe von max. 40 % der Mehrkosten zu einem vergleichbaren Fahrzeug mit konventionellem Antrieb. Die für den Betrieb notwendige Ladeinfrastruktur wird nur gefördert, sofern diese öffentlich zugänglich ist. Das Förderprogramm läuft bis zum 31.12.2019. (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2017)

5.6.3 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Von Seiten des BMWi gibt es schon länger Überlegungen, ein Förderprogramm für erdgasbetriebene Busse im ÖPNV aufzulegen. Wie lange dies noch dauert und ob es noch vor 2020 umgesetzt werden soll, ist momentan nicht absehbar. Bei aktuellen, umsetzungsnahen Projekten sollte aus diesem Grund ohne Zuschüsse in diesem Sektor geplant werden. (Schaarschmidt, 2017)

Fazit

Es ist davon auszugehen, dass es 2018/2019 eine Förderung für Elektrobusse geben wird, da das Förderprogramm des BMVI dann noch gilt. Es wird daher für Elektrobusse von einer Förderung von 40% der Mehrkosten der Busse (ohne Ladeinfrastruktur) ausgegangen. Ggf. wird es mit einem neuen Programm des BMUB noch höhere Förderquoten geben.

Das Programm für Hybridbusse läuft Ende 2017 aus, daher werden für diese Variante nachfolgend keine Fördergelder angesetzt.

6 Energie- und CO₂-Emissionsbilanz

Die nachfolgende Betrachtung zeigt den Energieeinsatz für die Solo- und Midibusse.

Die Fahrleistung verteilt sich auf die jeweils untersuchten alternativen Antriebe und, sobald Wartungs- o. Instandhaltungsarbeiten anstehen, auf die Reserve-Dieselbusse. Aus diesem Grund wird ein gewisser Anteil der Fahrleistung, der sich aus der Verfügbarkeit bestimmt, immer durch Dieselbusse abgedeckt.

6.1 Energiebilanzen

Die Brutto-Fahrleistung beläuft sich für die Solo-Busse auf ca. 205.600 km/a und für die Midi-Busse auf 374.700 km/a. Anhand der spezifischen Verbräuche, Heizwerte und Fahrstrecken wurde der Energieeinsatz wie folgt berechnet:

Tabelle 6-1: Energiebilanz Solobusse

Variante		Basis	1a	1b	2	3
		Dieselbus	Elektrobus ZA	Elektro / Diesel	Hybridbus	Erdgasbus - CNG
Summe	[km/a]	205.600	205.600	205.600	205.600	205.600
Anteil Diesel	[km/a]	205.600	24.600	70.600	24.600	12.600
Anteil Elektro	[km/a]		181.000	135.000		
Anteil Hybrid	[km/a]				181.000	
Anteil Erdgas	[km/a]					193.000
Verbrauch Diesel	[l/100km]	42	42	42	34	42
Verbrauch Diesel pro Jahr	[l/a]	86.400	10.300	29.700	70.900	5.300
Energiebedarf - Diesel	kWh _{Hi} /a	860.500	102.600	295.800	706.200	52.800
Verbrauch Strom	[kWh _{el} /100km]		110	110		
Energiebedarf - Strom	[kWh _{el} /a]		199.100	148.500		
Verbrauch CNG	[kg/100km]					40
	[kg/a]					77.200
Energiebedarf CNG	[kWh _{Hi} /a]					1.016.000
Summe Energiemenge	[kWh/a]	860.500	301.700	444.300	706.200	1.068.800

Tabelle 6-2: Energiebilanz Midibusse

Variante		Basis	1a	1b	2	3
		Dieselbus	Elektrobus ZA	Elektro / Diesel	Hybridbus	Erdgasbus - CNG
Summe	[km/a]	374.700	374.700	374.700	374.700	374.700
Anteil Diesel	[km/a]	374.700	44.700	85.700	44.700	22.700
Anteil Elektro	[km/a]		330.000	289.000		
Anteil Hybrid	[km/a]				330.000	
Anteil Erdgas	[km/a]					352.000
Verbrauch Diesel	[l/100km]	35	35	35	30	35
Verbrauch Diesel pro Jahr	[l/a]	129.800	15.500	29.700	112.300	7.900
Energiebedarf - Diesel	kWh _{Hi} /a	1.292.800	154.400	295.800	1.118.500	78.700
Verbrauch Strom	[kWh _{el} /100km]		100	100		
Energiebedarf - Strom	[kWh _{el} /a]		330.000	289.000		
Verbrauch CNG	[kg/100km]					33
	[kg/a]					116.200
Energiebedarf CNG	[kWh _{Hi} /a]					1.529.000
Summe Energiemenge	[kWh/a]	1.292.800	484.400	584.800	1.118.500	1.607.700

Generell liegt beim Elektrobetrieb der geringste und beim Erdgasbetrieb der höchste Energieeinsatz vor. Die folgenden Abbildungen verdeutlichen die Ergebnisse:

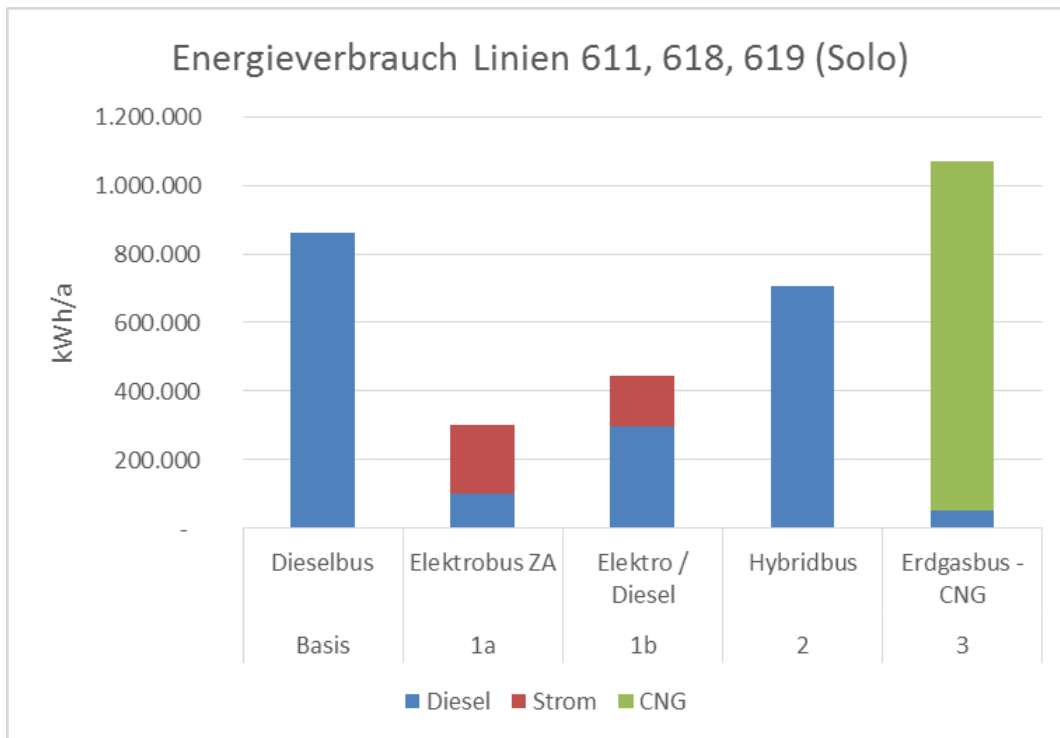


Abbildung 6-1: Energieverbrauch der Linien 611, 618, 619 (Solo)

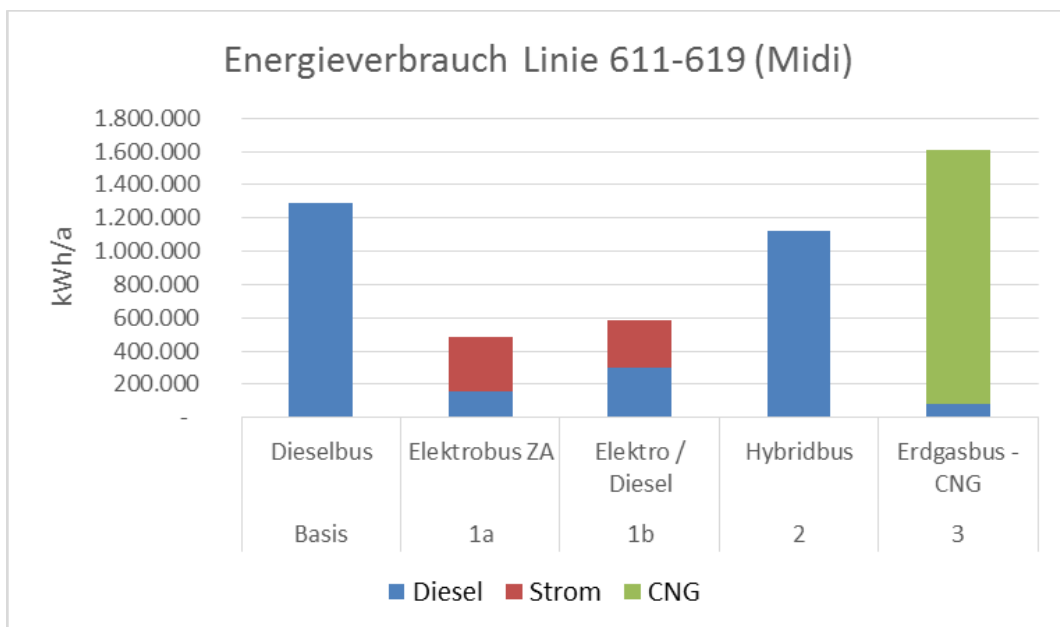


Abbildung 6-2: Energieverbrauch der Linien 611-619 (Midi)

6.2 CO₂-Emissionsbilanzen

Bei den einzelnen Varianten werden folgende Emissionen frei gesetzt:

Tabelle 6-3: Emissionsbilanz Solobusse

Variante		Basis	1a	1b	2	3
		Dieselbus	Elektrobus ZA	Elektro / Diesel	Hybridbus	Erdgasbus - CNG
Dieserverbrauch	[l/a]	86.400	10.300	29.700	70.900	5.300
Stromverbrauch	[kWh _{el} /a]		199.100	148.500		
Verbrauch CNG	[kg/a]					77.200
CO ₂ e Emissionen - Diesel	[tCO ₂ e/a]	258	31	89	212	16
CO ₂ e Emissionen - Strom	[tCO ₂ /a]		0	0		
CO ₂ e Emissionen - CNG	[tCO ₂ /a]		0	0		267
Summe	[tCO₂/a]	258	31	89	212	283
CO₂e- Einsparungen	[tCO₂e/a]		228	170	46	-25
	[%]		88%	66%	18%	-9%

Tabelle 6-4: Emissionsbilanz Midibusse

Variante		Basis	1a	1b	2	3
		Dieselbus	Elektrobus ZA	Elektro / Diesel	Hybridbus	Erdgasbus - CNG
Dieserverbrauch	[l/a]	129.800	15.500	29.700	112.300	7.900
Stromverbrauch	[kWh _{el} /a]		330.000	289.000		
Verbrauch CNG	[kg/a]					116.200
CO ₂ e Emissionen - Diesel	[tCO ₂ e/a]	388	46	89	336	24
CO ₂ e Emissionen - Strom	[tCO ₂ /a]		0	0		
CO ₂ e Emissionen - CNG	[tCO ₂ /a]		0	0		402
Summe	[tCO₂/a]	388	46	89	336	426
CO₂e- Einsparungen	[tCO₂e/a]		342	299	52	-38
	[%]		88%	77%	13%	-10%

Die höchsten Einsparungen im Vergleich zur Basisvariante sind bei der Variante 1a zu verzeichnen, da hier durch den Einsatz der Elektrobusse keine Emissionen vor Ort gegeben sind. Da ein gewisser Anteil trotzdem über Dieselbusse gefahren wird, entstehen aber auch hier Emissionen.

Die folgenden Abbildungen verdeutlichen die Ergebnisse:

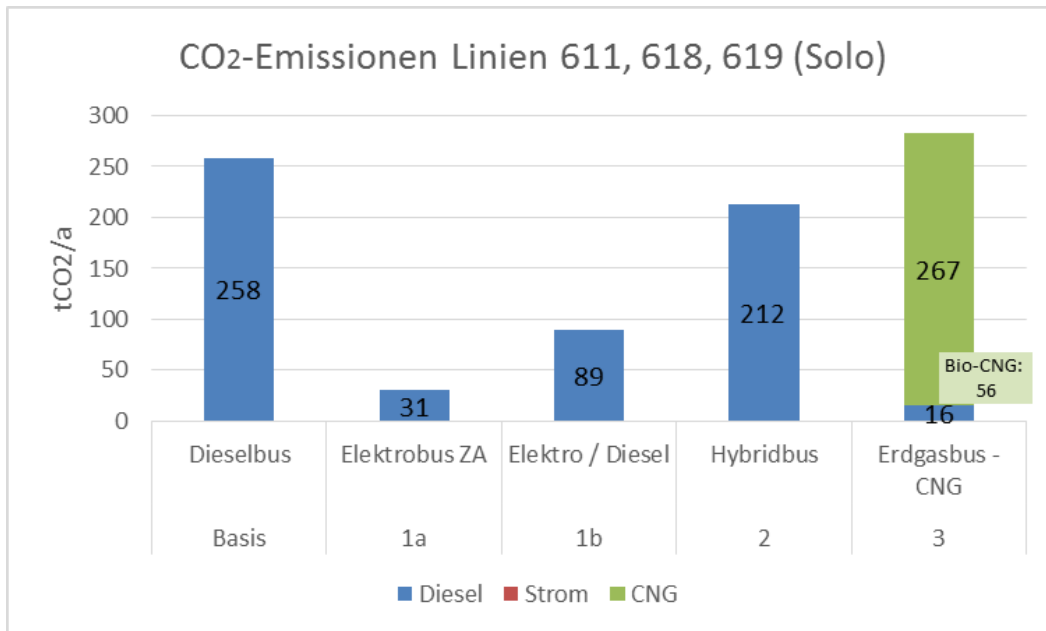


Abbildung 6-3: CO₂-Emissionen der Linien 611, 618, 619 (Solo)

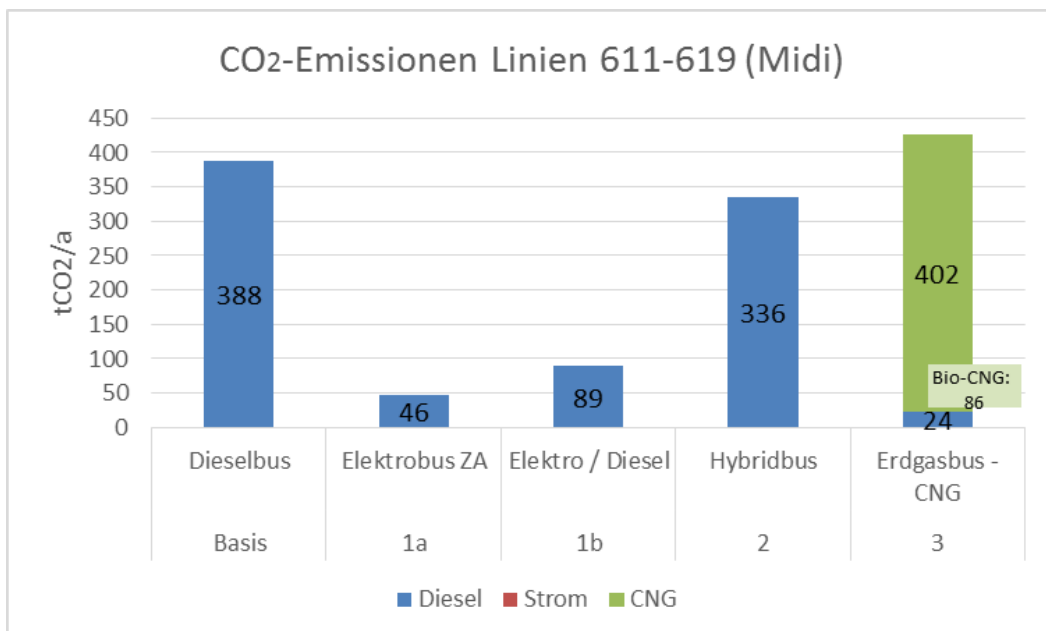


Abbildung 6-4: CO₂-Emissionen der Linien 611-619 (Midi)

Betrachtung Bio-CNG: Als Variante kann statt konventionellem CNG auch Bio-CNG zum Einsatz kommen. Die Emissionen liegen hier bei etwa einem Fünftel des konventionellen CNG.

7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt die Investitionen auf, die zu erwarten sind, sowie die resultierenden Jahreskosten bestehend aus Kapital-, Betriebs- und Verbrauchskosten. Über die statische Amortisationszeit werden Aussagen über die Wirtschaftlichkeit der Alternativen zur Basisvariante getroffen. Durch die Dynamik der Energiepreise, welche der wesentliche Einflussfaktor auf die Wirtschaftlichkeit sind, wird nachfolgend aufgezeigt, welche Entwicklungen zu erwarten sind.

7.1 Investitionskosten

Folgende Übersicht zeigt die Investitionen, mit denen bei den verschiedenen Varianten geplant werden muss. Die Kosten der Infrastruktur/Ladetechnik für die Elektrobusse wird auf die Bereich Solo- und Midibusse aufgeteilt.

Tabelle 7-1: Investitionskosten Solobusse

Variante	Basis	1a	1b	2	3
Werte in € inkl. MwSt.	Dieselbus	Elektrobus ZA	Elektro / Diesel	Hybridbus	Erdgasbus - CNG
Neupreis Busse	480.000	1.226.000	1.406.000	640.000	580.000
Ladeinfrastruktur Depot		44.000	18.000		
Ladeinfrastruktur Zwischenaufladung		323.000			
Restwert Elektrobusse		-228.000	-217.500		
Gesamtinvestitionskosten ohne Förderung	480.000	1.365.000	1.206.500	640.000	580.000
Mehrkosten		885.000	726.500	160.000	100.000
Mit Förderung					
Förderung Mehrkosten Elektrobusse (40%)		-298.000	-274.000		
Gesamtinvestitionskosten inkl. Förderung	480.000	1.067.000	932.500	640.000	580.000
Mehrkosten		587.000	452.500	160.000	100.000

Tabelle 7-2: Investitionskosten Midibusse

Variante	Basis	1a	1b	2	3
Werte in € inkl. MwSt.	Dieselbus	Elektrobus ZA	Elektro / Diesel	Hybridbus	Erdgasbus - CNG
Neupreis Busse	800.000	2.380.000	3.050.000	1.064.000	960.000
Ladeinfrastruktur Depot		20.000	20.000		
Ladeinfrastruktur Zwischenaufladung		509.000			
Restwert Elektrobusse		-444.000	-529.000		
Gesamtinvestitionskosten ohne Förderung	800.000	2.465.000	2.541.000	1.064.000	960.000
Mehrkosten		1.665.000	1.741.000	264.000	160.000
Mit Förderung					
Förderung Mehrkosten Elektrobusse (40%)		-632.000	-820.000		
Gesamtinvestitionskosten inkl. Förderung	800.000	1.833.000	1.721.000	1.064.000	960.000
Mehrkosten		1.033.000	921.000	264.000	160.000

Die Varianten der Elektrobusse weisen die höchsten Investitionskosten auf, so dass ohne Berücksichtigung der Förderung hohe Zusatzkosten zu erwarten sind. Dies ist begründet in den höheren Kosten der Busse an sich, der zusätzlich erforderlichen Busse sowie der Ladeinfrastruktur.

Mit Förderung ergibt sich hier ein wesentlich günstigeres Bild. Hier wurde ein Fördersatz von 40% der Mehrkosten der Busse angesetzt. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass es ab 2018 bessere Konditionen geben wird, so dass sich die erforderlichen Investitionen weiter verringern können.

Folgende Abbildungen verdeutlichen die Investitionen im Bereich der Solo- und Midibusse:

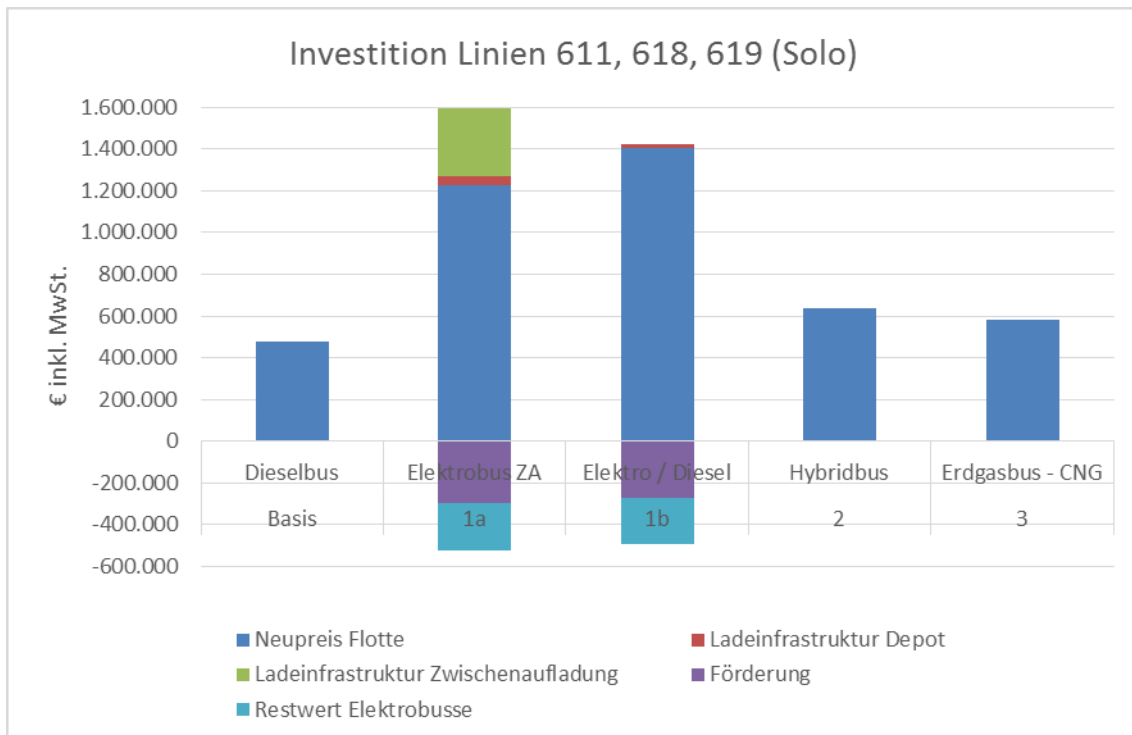


Abbildung 7-1: Investitionskosten Solobusse

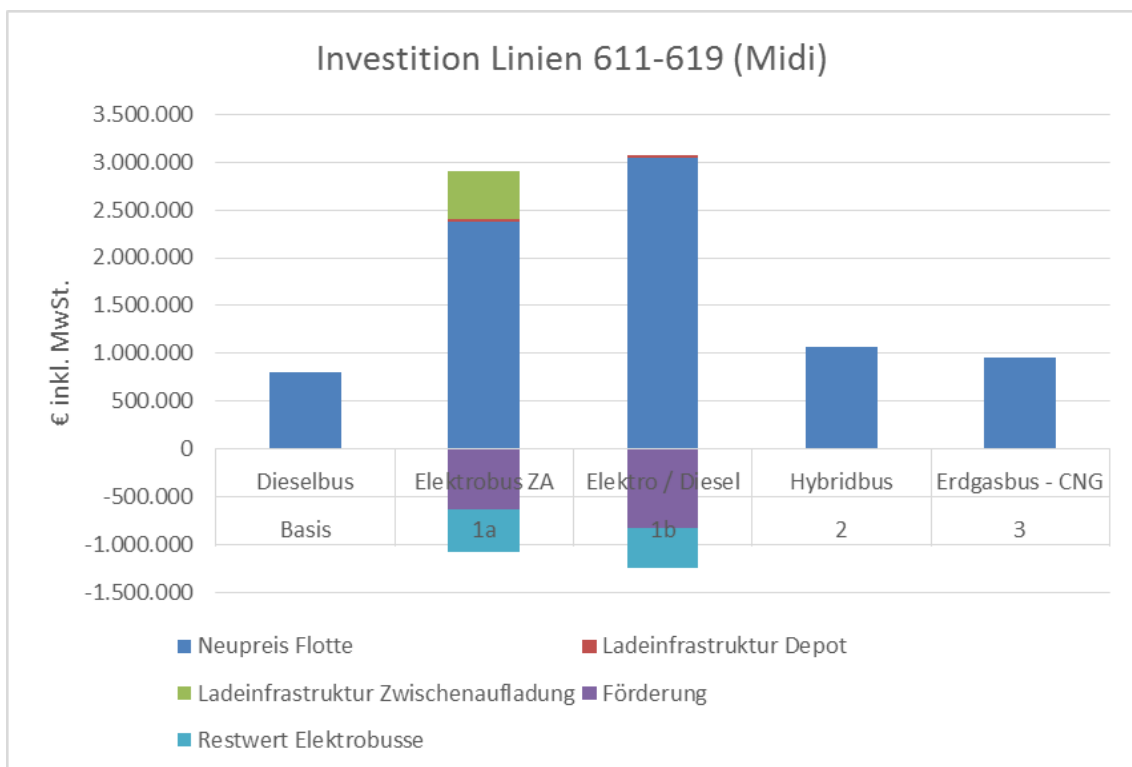


Abbildung 7-2: Investitionskosten Midibusse

7.2 Jahreskosten

Die Jahreskosten setzen sich zusammen aus den Kapital-, Verbrauchs- und Betriebskosten.

Die Berechnungen basieren auf den in Kap. 5.3 dargestellten Grundlagen. Weiterhin werden folgende Werte angesetzt:

- Kalkulatorischer Zinssatz: 3%
- Abschreibungsdauer: 10 Jahre
- Versicherungskosten: 1% der Investition in Busse und Ladetechnik
- Förderung von Elektrobussen von 40%

Tabelle 7-3: Jahreskosten Solobusse

Variante	Basis	1a	1b	2	3
Werte in €/a inkl. MwSt.	Dieselbus	Elektrobus ZA	Elektro / Diesel	Hybridbus	Erdgasbus - CNG
Investition inkl. Förderung	480.000	1.067.000	932.500	640.000	580.000
Kapitalkosten	56.000	125.000	109.000	75.000	68.000
Verbrauchs-kosten	95.000	49.100	60.900	78.000	83.000
Diesel	95.000	11.300	32.700	78.000	5.800
Strom		37.800	28.200		
CNG					77.200
Betriebskosten	91.200	88.500	92.650	96.900	96.300
Versicherung	4.800	14.000	14.100	6.400	5.800
Wartung/Instandhaltung	86.400	74.500	78.550	90.500	90.500
Jahreskosten	242.200	263.900	262.550	249.900	247.300
Mehrkosten		21.700	20.350	7.700	5.100
Stat. Amortisationszeit (Mehrinvestition)					
Ohne Förderung		18,7 a	22,3 a	14,2 a	14,5 a
Mit 40% Förderung Elektrobusse		12,4 a	13,9 a		
Bei 80% Förderung Elektrobusse - Annahme		6,1 a	5,5 a		

Tabelle 7-4: Jahreskosten Midibusse

Variante	Basis	1a	1b	2	3
Werte in €/a inkl. MwSt.	Dieselbus	Elektrobus ZA	Elektro / Diesel	Hybridbus	Erdgasbus - CNG
Investition inkl. Förderung	800.000	1.833.000	1.721.000	1.064.000	960.000
Kapitalkosten	94.000	215.000	202.000	125.000	113.000
Verbrauchs-kosten	142.800	79.800	87.600	123.500	124.900
Diesel	142.800	17.100	32.700	123.500	8.700
Strom		62.700	54.900		
CNG					116.200
Betriebskosten	165.400	161.900	170.750	175.500	174.500
Versicherung	8.000	26.500	30.500	10.600	9.600
Wartung/Instandhaltung	157.400	135.400	140.250	164.900	164.900
Jahreskosten	402.200	458.800	460.350	424.000	412.400
Mehrkosten		56.600	58.150	21.800	10.200
Stat. Amortisationszeit					
Ohne Förderung		25,9 a	34,9	28,7 a	18,2 a
Bei 40% Förderung		16,0 a	18,5 a	28,7 a	18,2 a
Bei 80% Förderung (Elektro) - Annahme		6,2 a	2,0 a		

Die Kapitalkosten liegen bedingt durch die hohen Investitionen bei den Varianten mit Elektro-bussen am höchsten. Im Gegensatz dazu ist hiermit wesentlich niedrigeren Verbrauchskosten zu rechnen. Hier stellt die Basisvariante die teuerste Möglichkeit dar. Die Betriebskosten unterscheiden sich in Summe nur wenig, insbesondere aufgrund der höheren angesetzten Versicherungskosten.

Solobusse: Ohne Förderung bzw. mit nur 40%iger Förderung weisen die Varianten mit Hybridbussen und Erdgasbussen die günstigsten Amortisationszeiten auf. Bei einer höheren Förderung von 80% sollten jedoch aus wirtschaftlicher Sicht Elektrobusse eingesetzt werden, da hier bei derzeitig gültigen Energiepreisen Amortisationszeiten von ca. 6 Jahren erreicht werden können.

Midibusse: gleiches wie bei den Solobussen gilt in etwa auch für die Midibusse. Ein Unterschied besteht allerdings bei den Hybridbussen, welche aufgrund der geringeren Einsparung an Diesel in Summe eine schlechtere Amortisationszeit aufweisen.

Folgende Abbildungen verdeutlichen die Ergebnisse:

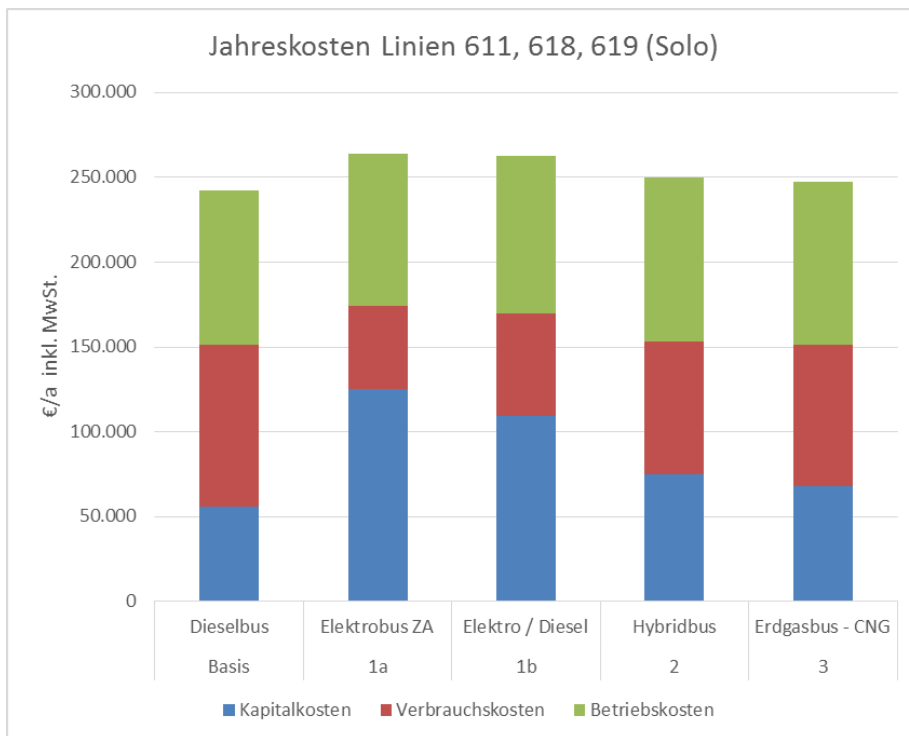


Abbildung 7-3: Jahreskosten Solobusse

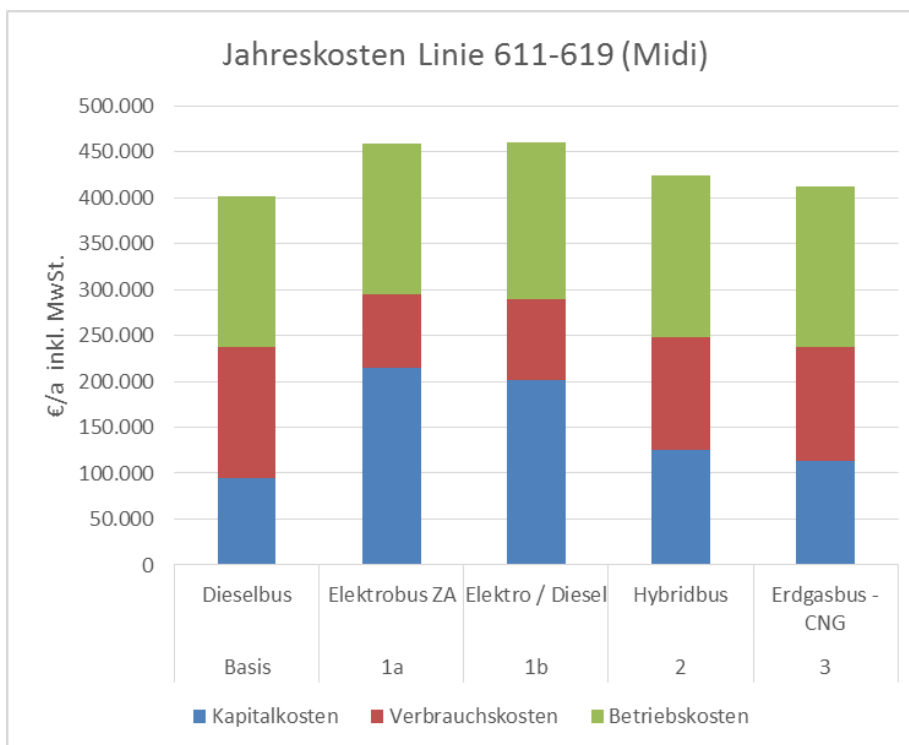


Abbildung 7-4: Jahreskosten Midibusse

7.3 Dynamik der Energiepreise

Wie in Kap. 5.5 dargestellt, sind die Kraftstoff- und Strompreise Entwicklungen unterworfen, welche relevant für die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Varianten sind. Die Prognosen gehen von steigenden Preisen für Diesel und Erdgas aus, während Strom in den nächsten Jahren tendenziell auch noch teurer, ab ca. 2025 aber auch wieder günstiger werden soll. Diese Überlegungen sollten in die Entscheidung über den zukünftigen ÖPNV-Betrieb einbezogen werden.

Folgende Abbildungen zeigen zum einen die Entwicklungen der Verbrauchskosten sowie der Jahreskosten¹⁷. Dabei wird von einer jährlichen Steigerung von 3% bei Diesel und Erdgas ausgegangen. Strom wird bis 2025 um ca. 1%/a teurer, danach um 1%/a günstiger.

Die Verbrauchs- und Jahreskosten der Varianten, die auf den fossilen Energieträgern Diesel und Erdgas basieren, steigen stärker als die der Varianten mit Elektro- und Hybridbussen. Langfristig sind diese Varianten also als günstiger zu bewerten. Hierdurch ergeben sich im Vergleich zur Basisvariante auch fallende Amortisationszeiten für die Mehrinvestition.

Die folgenden Abbildungen für Solo- und Midibusse verdeutlichen die Sachverhalte:

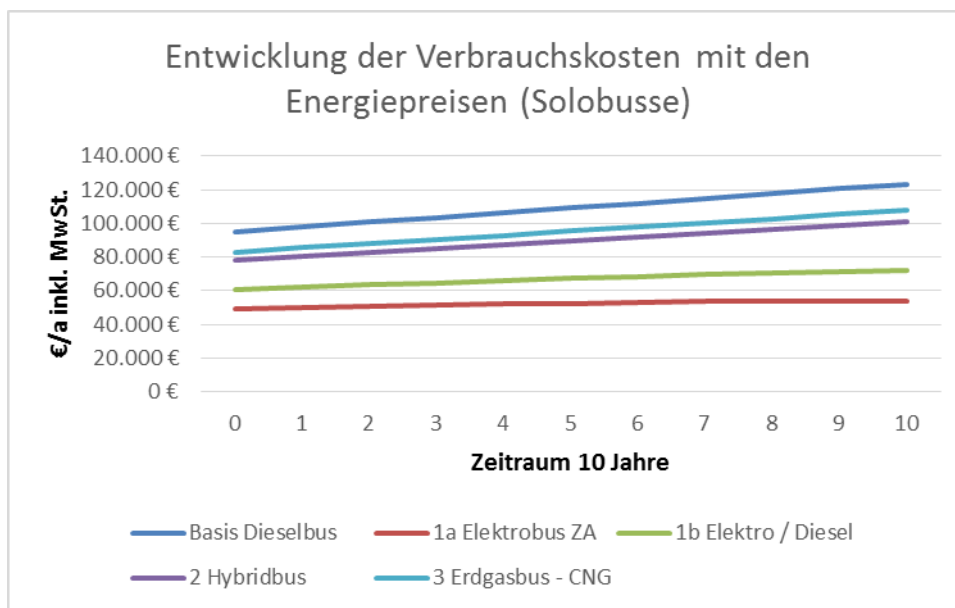


Abbildung 5: Entwicklung der Verbrauchskosten mit den Energiepreisen (Solobusse)

¹⁷ Die Kapitalkosten beinhalten die Investitionen inkl. Förderung von 40% der Mehrkosten

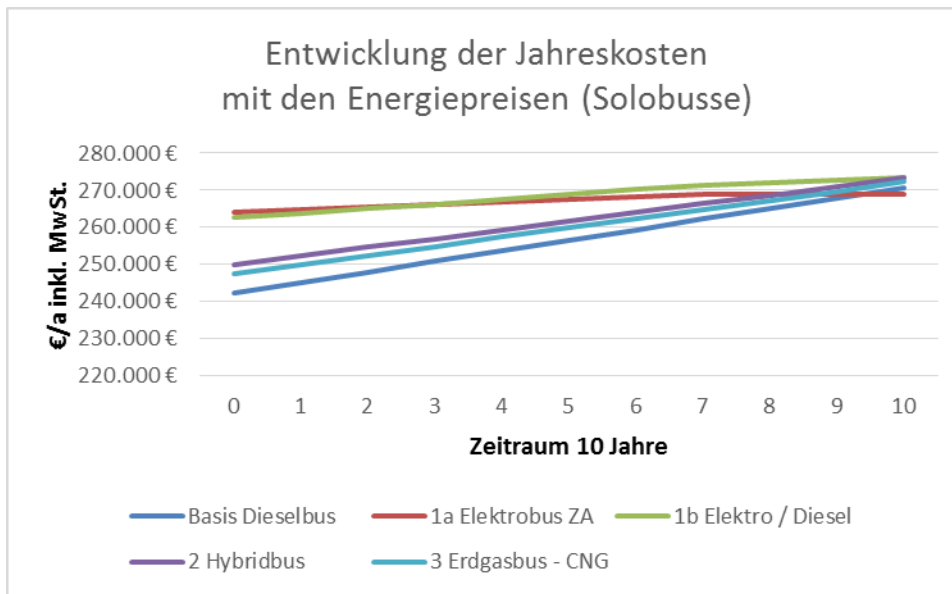


Abbildung 6: Entwicklung der Jahreskosten mit den Energiepreisen (Solobusse)

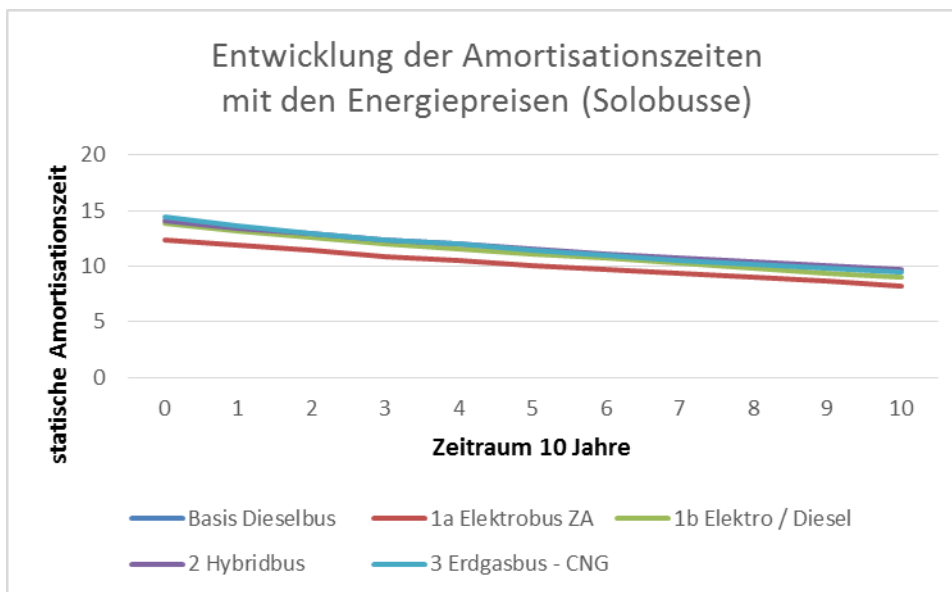


Abbildung 7: Entwicklung der Amortisationszeiten mit den Energiepreisen (Solobusse)

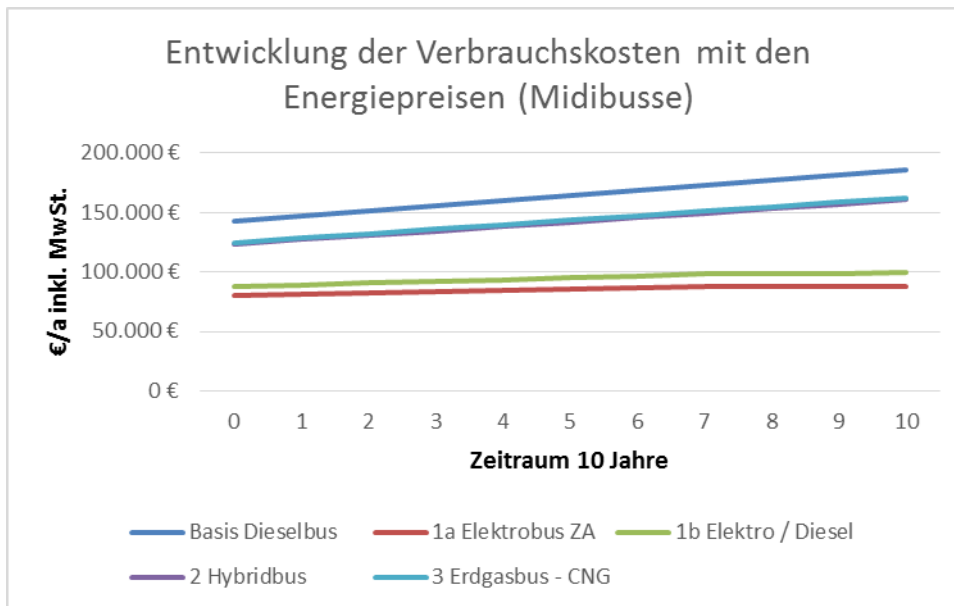


Abbildung 8: Entwicklung der Verbrauchskosten mit den Energiepreisen (Midibusse)

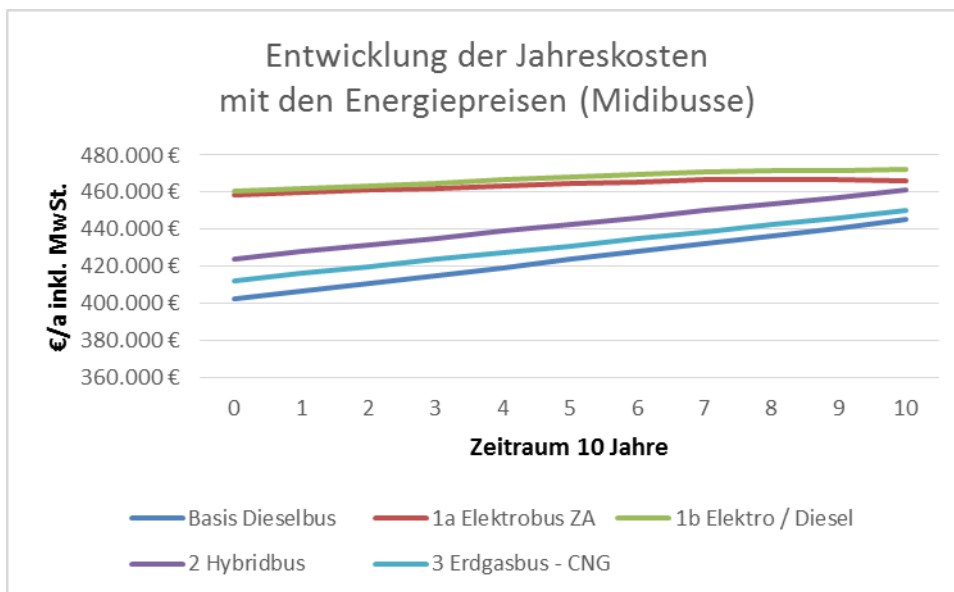


Abbildung 9: Entwicklung der Jahreskosten mit den Energiepreisen (Midibusse)

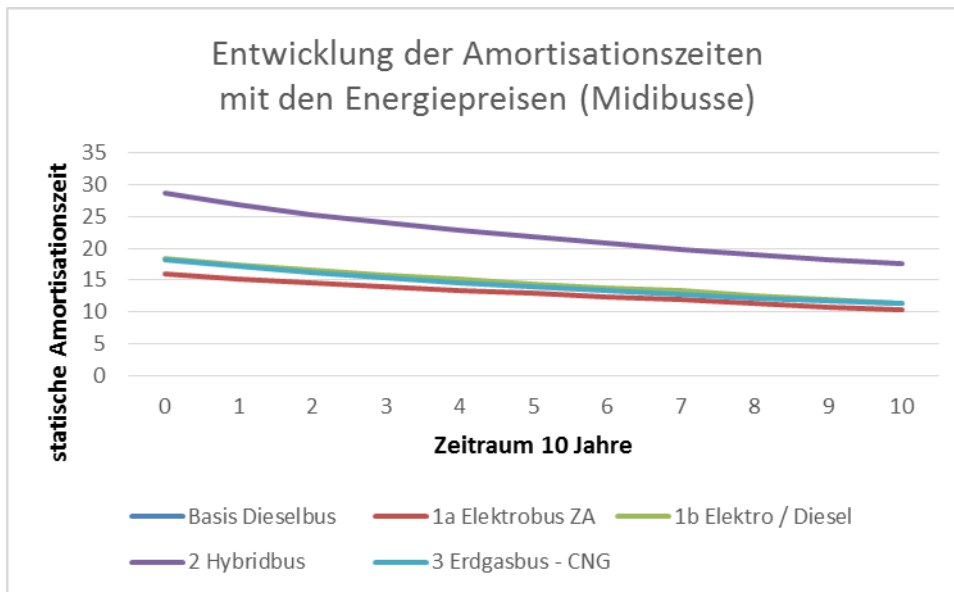


Abbildung 10: Entwicklung der Amortisationszeiten mit den Energiepreisen (Midibusse)

7.4 Variante Eigenstromerzeugung

Als Alternative zum externen Strombezug kann Strom auch selbst erzeugt werden, so dass hier andere Stromkosten anzusetzen sind. Angesetzt wurde ein Strompreis von 12 Ct/kWh, der beispielhaft durch eine eigene PV-Anlage erzeugt wird. Als Basisstrompreis für den Netzbezug wurden 19 Ct/kWh angesetzt. Je nach Anteil des reduzierten Strompreises am Gesamtstrombedarf ergeben sich ein niedriger Strommischpreis und damit niedrigere Verbrauchskosten. Diese sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

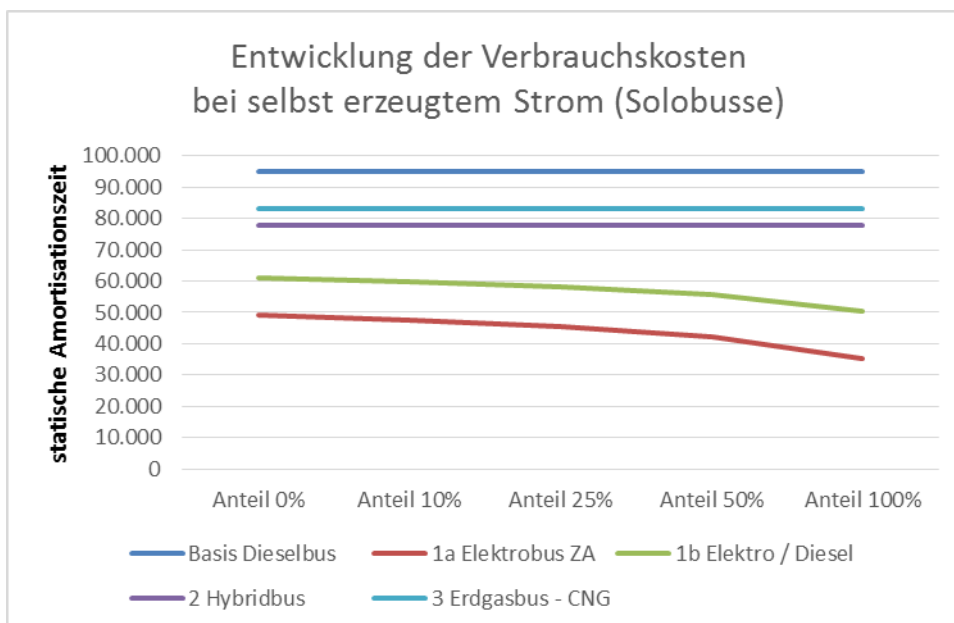


Abbildung 11: Entwicklung der Verbrauchskosten bei selbst erzeugtem Strom (Solobusse)

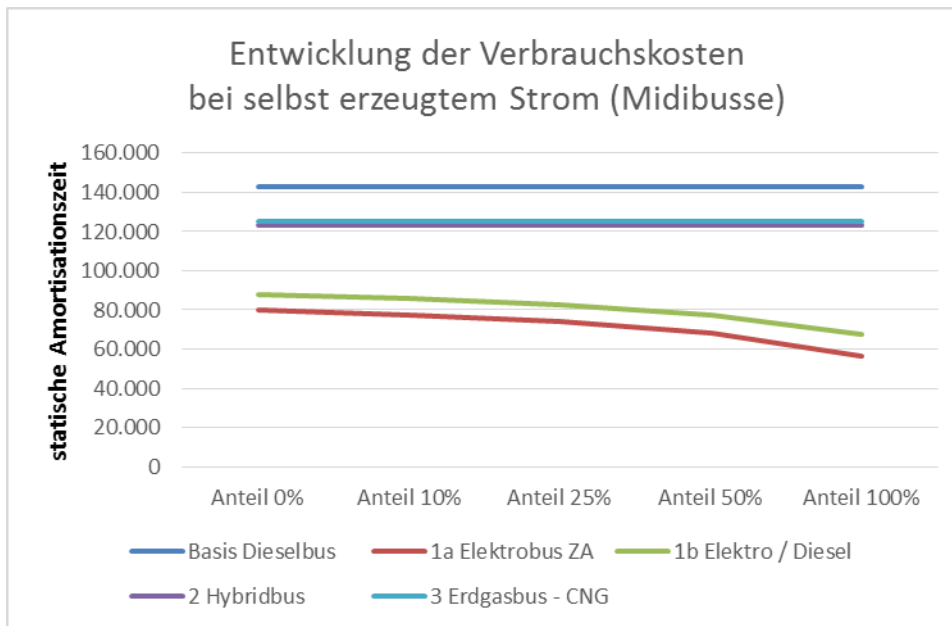


Abbildung 12: Entwicklung der Verbrauchskosten bei selbst erzeugtem Strom (Midibusse)

Kritisch zu beurteilen bleibt hier die Höhe der Strompreis-Einsparung und des Anteils, der über die Eigenstromerzeugung abgedeckt werden kann. Um dies im Detail zu beurteilen, müsste eine separate Betrachtung mit Dimensionierung einer PV-Anlage erfolgen. Weiterhin wäre bei dieser PV-Anlage abzuschätzen, wieviel Strom selbst genutzt und wieviel Strom eingespeist oder gespeichert werden müsste. Dies beeinflusst die Wirtschaftlichkeit und den anzusetzenden Strompreis erheblich.

7.5 Dynamik der Investitionskosten der Elektrobusse

Nachfolgend wird eine Entwicklung der Investitionskosten der Elektrobusse betrachtet. Ausgehend von 100% werden die Jahreskosten angegeben für eine Reduzierung der Investitionen auf 90%, 80% und 70%. Ob eine solche Entwicklung realistisch ist, werden die nächsten Jahre zeigen. Die Werte wurden bei einer Förderquote von 40% angegeben. Hier ist zu beachten, dass sich die Höhe der Förderung natürlich auf die anzusetzenden Investitionskosten auswirkt.

Unter der Annahme reduzierter Investitionen auf weniger als ca. 70% – 65% ist von etwa gleichen Jahreskosten wie beim Dieselbetrieb auszugehen. Die folgenden Abbildungen verdeutlichen die Ergebnisse:

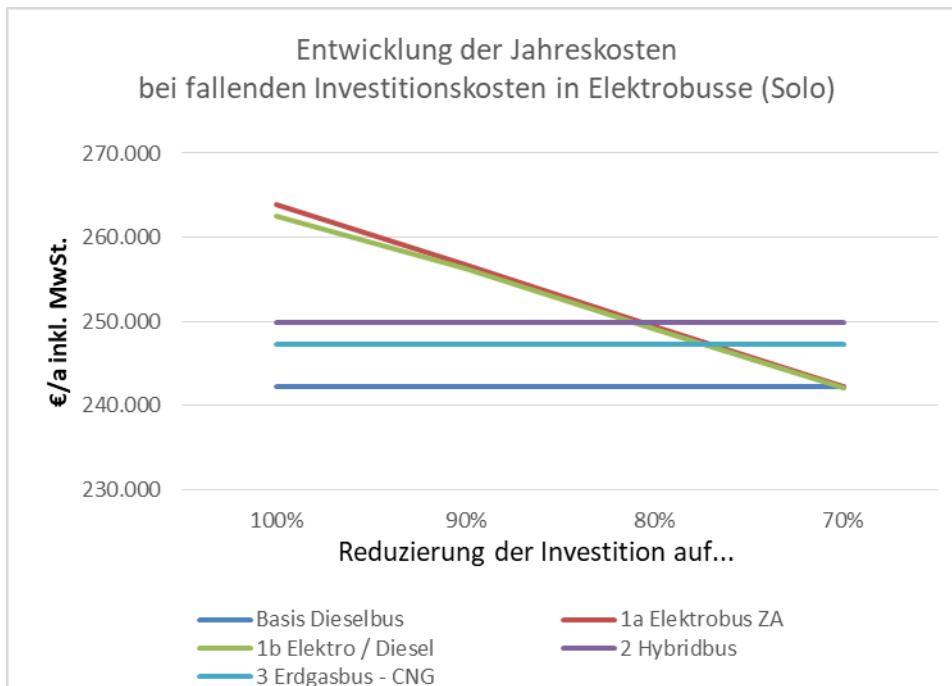


Abbildung 13: Entwicklung der Jahreskosten bei Reduzierung der Investition (Solobusse)

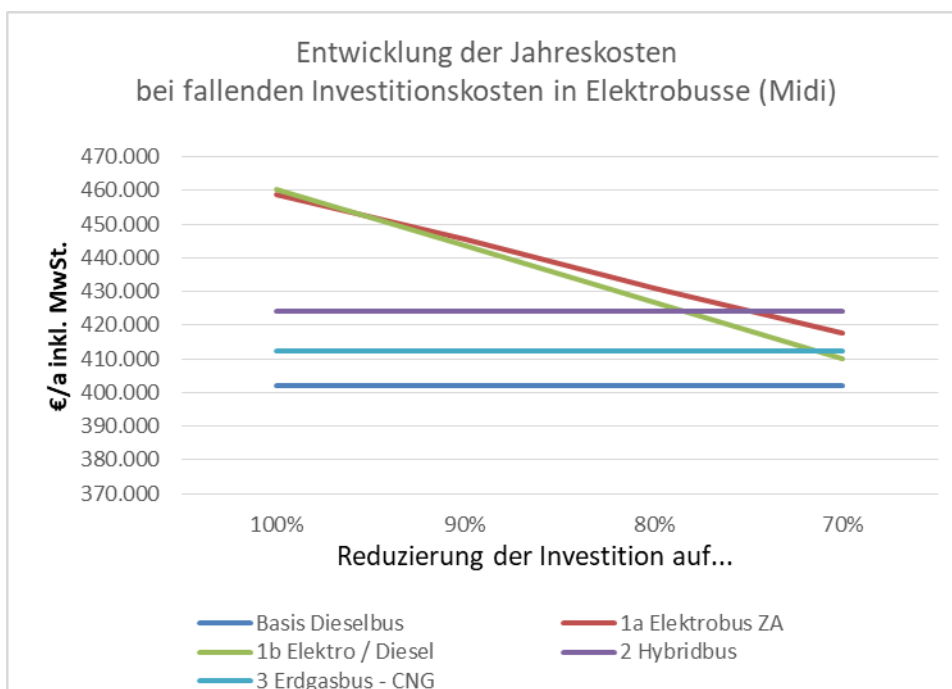


Abbildung 14: Entwicklung der Jahreskosten bei Reduzierung der Investition (Midibusse)

8 Ergebnisse, Empfehlungen und weitere Vorgehensweise

8.1 Ergebnisse der Bilanzbetrachtungen

8.1.1 Elektrobusse (Variante 1a u. 1b)

Energie- und Emissionsbilanz zeigen die Vorteile einer Flotte aus Elektrobussen. Die Varianten 1a und 1b weisen hier die besten Werte auf, da nur ein geringfügiger Teil der Fahrten durch Dieselbusse erfolgt. Es wurde davon ausgegangen, dass klimaneutraler Strom eingesetzt wird, so dass vor Ort keine Emissionen entstehen. Die Betrachtung mit Zwischenaufladung weist hier eine bessere Bilanz auf, da weniger Diesel zum Einsatz kommt.

Bei den Elektrobussen sind zwar die höchsten Investitionen gegeben, jedoch bestehen gute Optionen relevante **Förderungen** nutzen zu können. Wie hoch die Förderungen ausfallen werden, wird sich mit der Veröffentlichung der neuen Förderrichtlinie ergeben. Dann sollte eine Aktualisierung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgen. Sofern neben den Mehrkosten für die Busse auch die Kosten für die Ladeinfrastruktur finanziell unterstützt werden, können sich hier gute bis sehr gute Amortisationszeiten ergeben.

Die langfristige Entwicklung der **Energiepreise** spricht ebenfalls für Elektrobusse, da für Strom von geringeren Kostensteigerungen auszugehen ist als bei Diesel- und Erdgasbussen.

Eine Weiterentwicklung der **Batteriekapazität** ist zu erwarten. Dies hat sich auch schon in den vergangenen Jahren gezeigt, in denen sich die Reichweite der Elektrobusse deutlich erhöht hat. So scheinen Reichweiten von 260 – 280 km pro Ladung in wenigen Jahren realistisch. Dies hat zur Auswirkung, dass sich der Dieselverbrauch bzw. die mit Diesel gefahrene Strecke reduzieren wird. Damit einher geht eine Reduzierung der Verbrauchskosten (weniger Diesel-, mehr Stromeinsatz) sowie der Wartungskosten (Elektroantrieb ist günstiger als der Dieselantrieb).

Energieeinsatz und Emissionen sprechen für den Einsatz von Elektrobussen. Aufgrund der hohen Investitionskosten lässt sich die Wirtschaftlichkeit jedoch nur in Verbindung mit einer ausreichenden Förderung, zukünftig steigenden Energiekosten und ggf. niedrigeren Investitionskosten erreichen. Wie die Förderung aussehen wird, lässt sich derzeit jedoch noch nicht sagen.

Der Aufwand für die Umsetzung ist hoch, speziell für die Zwischenaufladung und sonstige Infrastruktur fallen hohe Kosten zusätzlich zu den Bussen an. Dies ist auch begründet im Fahrplan, auf dessen Grundlage die Betrachtung erfolgte. Da die Zwischenaufladung sehr aufwendig und teuer ist und davon auszugehen ist, dass sich die Batteriekapazitäten zukünftig erhöhen werden, sollte der Variante ohne Zwischenaufladung der Vorzug gegeben werden. Auch die geringen Aufladezeiten am Bahnhof sprechen nicht für die Umsetzung einer Zwischenaufladung, da dies mit sehr hohen Strömen verbunden ist.

Eine Umstellung auf Elektrobusse ist am sinnvollsten, sofern dies für alle Busse erfolgt. Zum einen ist dies höchstwahrscheinlich für eine Förderung erforderlich, zum anderen lassen sich die fixen Zusatzkosten für die Infrastruktur dann auf mehrere Linien verteilen.

8.1.2 Hybridbusse (Variante 2)

Durch Hybridbusse kann, je nach Strecke und Fahrverhalten, bis zu etwa ein Viertel des Dieselverbrauchs eingespart werden. Hierdurch sind die Emission und der Energieeinsatz geringer als bei der Basisvariante.

Es sind höhere Investitionen erforderlich als für reine Dieselbusse, die bei etwa 30% liegen. Derzeit besteht eine Förderung für Hybridbusse. Ob diese auch in den nächsten Jahren bestehen bleibt, wird sich in 2018 zeigen. Ohne eine Förderung liegen die Jahreskosten über denen der Basisvariante, was in den höheren Betriebs- und Kapitalkosten begründet ist. Es ergibt sich für die Solobusse eine Amortisationszeit von etwa 14 Jahren und bei den Midibussen von etwa 29 Jahren. Letzteres lässt sich wie folgt begründen:

In den vorangegangenen Betrachtungen wurden Untersuchungen für alle Solo- und alle Midibusse in Summe durchgeführt. Dabei fällt bei den Hybridbussen ins Gewicht, dass speziell die **Linien 614 und 619** nicht optimiert für den Hybridbetrieb sind. Aufgrund der längeren Strecken über Land mit höheren Geschwindigkeiten ist davon auszugehen, dass nur wenig Bremsenergie zurück gewonnen werden kann. Dadurch ergibt sich im Mittel bei den Midibussen eine geringe Gesamtkraftstoffeinsparung und damit relativ schlechte Wirtschaftlichkeit der Variante. Sollten Hybridbusse umgesetzt werden, sollten die Linie 614 und 619 detailliert auf Einsparungen überprüft werden.

Sollte in 2018 die **Förderung** von Hybridbussen weiter geführt werden, ergäbe sich für die Solobusse eine Amortisationszeit von etwa 8 Jahren (Annahme: Förderung von 70.000 €). Für Midibusse gibt es bisher keine Förderungen.

Hybridbusse können bis auf die Linie 614 und 619 gut im ÖPNV Ingelheim eingesetzt werden, allerdings sind hier nur Einsparungen von etwa einem Viertel der Dieselmenge realistisch. Damit werden die Emissionen zwar reduziert, jedoch nicht optimal vermieden. Wirtschaftlich lässt sich der Einsatz von Hybridbussen nur darstellen, sofern Fördergelder akquiriert werden können. Ob dies realistisch ist, wird sich im nächsten Jahr zeigen. Vorteil der Variante ist es, dass die Zusatzkosten überschaubar und einplanbar sind, da keine zusätzliche Infrastruktur benötigt wird.

8.1.3 Erdgasbusse (CNG, Variante 3)

Der Energieverbrauch der Erdgasbusse liegt noch über dem der Dieselbusse, was jedoch technisch bedingt ist. Damit liegen die Emissionen auch höher als bei allen anderen Varianten. Sollte allerdings reines Bio-CNG eingesetzt werden, reduzieren sich die Emissionen erheblich. In wie weit dies umsetzbar ist, wäre allerdings im Detail zu prüfen.

Die Investitionskosten liegen etwa 20% höher als bei den Dieselbussen. Zusammen mit den Betriebs- und Verbrauchskosten ergibt sich für die Jahreskosten gegenüber der Basisvariante keine Einsparung. Die Amortisationszeit liegt mit knapp 15 Jahren (Solobusse) bzw. 18 Jahren (Midibusse) über der Abschreibungsdauer der Busse. Mit der Entwicklung der Energiepreise wird

sich die Amortisationszeit jedoch verbessern und könnte in 10 Jahren bei etwa 10 - 11 Jahren liegen.

Hinzu kommt, dass eine geeignete **Infrastruktur** mit einer Erdgastankstelle vorausgesetzt wird. Die Kosten hierfür wurden wie bereits erläutert nicht angesetzt. Sollten hier noch zusätzliche Kosten entstehen, fiel die Wirtschaftlichkeit noch schlechter aus.

Die Variante „CNG“ kann aufgrund der vergleichbar schlechteren Energie- und Emissionsbilanz sowie der höheren Kosten im Vergleich zur Basisvariante nicht empfohlen werden. Unwägbarkeiten wie eine Erdgastankstelle sowie die politischen Rahmenbedingungen, die von den fossilen Energieträgern wegführen, erschweren zudem den Einsatz von Erdgasbussen.

8.2 Fazit und weitere Vorgehensweise

Die Vorteile der Elektrobusse liegen im Bereich des Energieeinsatzes und der Emissionen. Der ÖPNV in Ingelheim lässt sich prinzipiell auf diese Technologie umstellen. Um einen ökologischen und auch wirtschaftlichen ÖPNV zu gewährleisten, sind jedoch höhere Investitionen und eine Optimierung des Fahrplans erforderlich, so dass sich ggf. die Anzahl der erforderlichen Busse noch reduzieren lässt. Eine zukünftige Förderung ist wahrscheinlich. Die Höhe ist jedoch ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit. Prinzipiell ist hier darauf zu achten, dass dann wahrscheinlich alle Linien auf Elektrobusse umzustellen sind.

Da es sich hierbei um eine innovative Technologie handelt, sind hier zum einen in den nächsten Jahren noch positive Entwicklungen hinsichtlich Technik, Betriebsverhalten und Kosten zu erwarten. Damit wird sich die Wirtschaftlichkeit insgesamt verbessern. Auch zukünftig steigende Energiepreise sprechen für den Einsatz von Elektrofahrzeugen.

Hybridbusse lassen sich auf den meisten Linien gut einsetzen (Linie 614 und 619 sind zu prüfen). Sie stellen aus Sicht des Klimaschutzes und der Wirtschaftlichkeit einen Mittelweg zwischen dem reinen Diesel- und Elektrobetrieb dar. Die Umsetzung kann ohne größeren Aufwand erfolgen, da die Busse eine große Reichweite aufweisen und keine zusätzliche Infrastruktur erforderlich ist.

Welche Variante umgesetzt wird, hängt nun von der Schwerpunktsetzung hinsichtlich des Klimaschutzes und auch dem weiteren Zeitplan ab. Energieeinsatz und Emissionen sprechen für den Einsatz von Elektrobusen. Sofern eine gute **Anpassung des Fahrplans** erfolgen kann, wird sich hier auch die Wirtschaftlichkeit verbessern. Hierfür ist jedoch auch die **Förderung** relevant, zu welcher jedoch erst in etwa einem halben Jahr Aussagen getroffen werden können.

9 Literaturverzeichnis

- Autogazetta. (21. 08 2015). *Günstige Dieselpreise hemmen - Schmales Angebot an Erdgas-Bussen*. Abgerufen am 13. 01 2017 von <http://www.autogazette.de/daimler/iveco/nutzfahrzeuge/schmales-angebot-an-erdgas-bussen-526174.html>
- BGL. (20. 04 2017). *Dieselpreisinformation*. Abgerufen am 25. 04 2017 von www.bgl-ev.de/images/downloads/dieselpreisinformation.pdf
- Blickpunkt, B. (2016). *Test Mercedes-Benz Citaro NGT*. Abgerufen am 17. 01 2017 von <http://www.busnetz.de/downloads/2016-08-bustest.pdf>
- Bluebus. (2017). *Le Bluebus 12 mètres 100% électrique*. Abgerufen am 23. 01 2017 von <https://drive.google.com/file/d/0B5x0-EA4n77uN01teS1GX3Z6dzg/view>
- BMVI. (2015). *Hybrid- und Elektrobustprojekte in Deutschland*. Abgerufen am 26. 09 2016 von https://www.now-gmbh.de/content/5-service/4-publikationen/1-begleitforschung/statusbericht_elektromobilitaet_2014_hybrid-_und_elektro.pdf
- Bonhoff, D. (10. 09 2015). Keynote: Elektrische Antriebe im ÖPNV in Deutschland. Münster.
- BPV Consult GmbH. (2016). Weiterentwicklung des Stadtbustverkehrs in Ingelheim ab 2019. Ergebnispräsentation Oktober.
- Bundeskompetenzzentrum Barrierefreiheit. (2017). *Barrierefreiheit*. Abgerufen am 04. 01 2017 von <http://www.barrierefreiheit.de/>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. (2017). <https://www.klimaschutz.de>. Abgerufen am 25. April 2017 von <http://www.bmub.bund.de/pressemitteilung/elektrobuste-sind-wichtig-fuer-nachhaltige-mobilitaet/>
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2017). <http://www.bmvi.de>. Abgerufen am 25. April 2017 von <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/foerderrichtlinie-elektromobilitaet.html?nn=12830>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. (2015). *BMUB-Förderprogramm für Hybridbuste*. Abgerufen am 25. April 2017 von <http://www.bmub.bund.de>: <https://www.klimaschutz.de/de/programm/foerderprogramm-fuer-hybridbuste>
- Busplaner. (2017). *Mercedes-Benz Citaro-NGT*. Abgerufen am 17. 01 2017 von <http://www.busplaner.de/omnibustmagazin/omnibustest/12396/Mercedes-Benz/Citaro-NGT>

- BYD. (2017). *Datenblatt*. Abgerufen am 20. 01 2017 von <http://www.gabelstaplerservice-rinteln.de/pdfemobil/Datenblatt-BYD-eBus-Elektrobus-250km-Reichweite-GSK-Lifepocenter-Nord.pdf>
- Deutscher Behindertenrat. (kein Datum). *Standards der Barrierefreiheit*. Abgerufen am 04. 01 2017 von <http://www.deutscher-behindertenrat.de/mime/26375D1086261559.pdf>
- EBE-Bus. (2017). *Datenblatt Blue City Bus*. Abgerufen am 20. 01 2017 von <http://www.ebe-europa.com/wp-content/uploads/2015/09/BLUE-CITY-BUS-Datenblatt-Stand-11002015.pdf>
- Ebusco. (kein Datum). Abgerufen am 20. 01 2017 von 2017: <http://www.ebusco.eu/>
- Energieportal. (op). *Die Brennstoffzellentechnik*. Abgerufen am 22. Feb. 2014 von <http://www.energieportal24.de/cms1/wissensportale/energiespeicherung/brennstoffzelle/bsz-technik/>
- Erdgas mobil. (2013). *Erdgas im ÖPNV*. Abgerufen am 24. 01 2017 von https://www.erdgas-mobil.de/.../ERDGAS_im_OEPNV_Stand_und_Perspektiven.pdf
- Erdgas. (op). *Solaris Urbino CNG*. Abgerufen am 14. Februar 2014 von <http://www.erdgas-mobil.de/flottenkunden/vielseitig/solaris-urbino-cng/>
- gas2. (2014). <http://gas2.org>. Abgerufen am 09. Mai 2017 von <http://gas2.org/wp-content/uploads/2014/09/Volvo-7900-PHEV-Bus.png>
- Golem Media GmbH. (2017). <https://www.golem.de>. Abgerufen am 09. Mai 2017 von <https://www.golem.de/news/elektromobilitaet-milton-keynes-setzt-elektrobusse-ein-1401-103849.htm>
- Greencarcongress. (2016). Abgerufen am 23. 01 2017 von <http://www.greencarcongress.com/2016/11/20161130-ballard.html>
- Grüne, S. (27. Mai 1999). *Die Brennstoffzelle*. Abgerufen am 22. Feb. 2014 von <http://mathechemie.de/brenzel.htm>
- Helsper, B. (2014). *Vergleich der Eignung von rein batterieelektrisch angetriebenen Stadtbussen*. Masterarbeit, Transferstelle Bingen, Bingen am Rhein.
- Hool, v. (op). *A330 CNG (Erdgas), Technische Daten*. Abgerufen am 14. Februar 2014 von <http://www.vanhool.be/DEU/OPNV/CNG/a330cngDE.html>
- Iveco. (2017). *CITELIS*. Abgerufen am 17. 01 2017 von http://www.iveco.com/germany/collections/technical_sheets/Documents/Irisbus/Urbani/CITELIS%20CNG%2010,5m,%20IM%20AG.pdf
- Iveco. (2017). *Iveco Citelis Hybrid Broschüre*. Abgerufen am 17. 01 2017 von http://www.iveco.com/germany/collections/technical_sheets/Documents/Irisbus/Urbani/1982_12_PL_1982_12_iveco_citelis_hybrid_brosch.pdf

- Iveco. (2017). *Urbanway*. Abgerufen am 17. 01 2017 von http://www.iveco.com/germany/collections/technical_sheets/Documents/Irisbus/Urbani/CITELIS%20CNG%2012m,%20IM%20AG.pdf
- Knote, D.-I. (2015). Einführungskonzept für innovative Antriebe für den Linienbusbetrieb im Landkreis München.
- Kolbe, G. (2015). *Saubere Busse im ÖPNV*. (Verkehrsclub Deutschland, Hrsg.) Abgerufen am 26. 09 2016 von www.cleanair-europe.org/fileadmin/user_upload/redaktion/downloads/Guideline_Saubere_Busse_im_OEPNV_Clean_Air_VCD_.pdf
- Liempt, C. v. (2011). *Stadt Bingen - Referenzstandort für Elektromobilität, Bachelorarbeit*. Bingen am Rhein.
- Mader. (10 2016). aktuelle Einsatzbedingungen ÖPNV Ingelheim. (N. Rauth, Interviewer)
- MAN. (09. 01 2017). *MAN Lion's City CNG*. Abgerufen am 09. 01 2017 von <http://www.bus.man.eu/de/de/stadtbusse/man-lions-city-cng/uebersicht/Uebersicht.html>
- MAN Hybrid. (12. 12 2016). *MAN Lion's City Hybrid*. Von <http://www.bus.man.eu/de/de/stadtbusse/man-lions-city-hybrid/technik/Motor-und-Getriebe.html> abgerufen
- MAN Lion's City. (2016). *MAN Lion's City*. Abgerufen am 17. 01 2017 von http://www.bus.man.eu/man/media/de/content_medien/doc/business_website_bus_master_1/Lions_City.pdf
- MBJV. (2017). *Gesetze im Internet*. Abgerufen am 04. 01 2017 von <https://www.gesetze-im-internet.de/bgg/>
- Mercedes Benz. (2017). *Citaro NGT*. Abgerufen am 17. 01 2017 von http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/bus/home/new_buses/models/regular_service_busses/citaro_ngt.html
- Mercedes-Benz. (2011). Technische Informationen. *18 m Erdgasbus Mercedes-Benz Citaro O 530 CNG Technische Informationen*.
- Mercedes-Benz. (2011). Technische Informationen.: *12m Erdgasbus Mercedes-Benz Citaro O 530 CNG Technische Informationen*.
- MUKE. (2012). *Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, H2 BW Innovationsprogramm Wasserstoffinfrastruktur Baden-Württemberg*. Stuttgart.
- MVG. (07. 09 2016). *Pressemitteilung: Brennstoffzellen sollen Mainzer Busse antreiben*. (M. Mainz, Herausgeber) Abgerufen am 09. 01 2017 von <http://www.mainzer-stadtwerke.de/medien/presseforum/pressemitteilungen/pressemitteilung/article/brennstoffzellen-sollen-mainzer-busse-antreiben/>

- newsTix. (30. Nov. 2011). *Hybridbus-Test: MVG zieht Zwischenbilanz - Fahrzeuge praxistauglich, aber nicht serienreif*. Abgerufen am 15. Feb. 2014 von <http://newstix.de/?session=&site=actual&startentry=0&entmsg=true&mid=16706>
- NOW. (23. 01 2017). *Aufbau Wasserstoff-Tankstellennetz*. Von <http://www.now-gmbh.de/nationales-innovationsprogramm/aufbau-wasserstoff-tankstellennetz> abgerufen
- Omnibusarchiv. (2017). *VDL Citea SLF 120 Hybrid*. Abgerufen am 17. 01 2017 von <http://www.omnibusarchiv.de/include.php?path=article&contentid=839&page=3>
- Omnibusrevue. (2016). *Buskatalog Volvo 7900 Midi*. Abgerufen am 17 01 von <http://www.omnibusrevue.de/7900h-1120085.html>
- Omnibusrevue. (17. 01 2017). *Buskatalog Volvo 7900 Solo*. Von <http://www.omnibusrevue.de/volvo-7900-h-4x2-12-m-1120082.html> abgerufen
- Omnibusrevue. (2017). *Solaris Urbino*. Abgerufen am 17. 01 2017 von <http://www.omnibusrevue.de/solaris-urbino-12-hybrid-und-urbino-12-cng-auf-der-iaa-1817422.html>
- Rhein Hessische. (2017). *Stromkennzeichnung gemäß § 42 EnWG, Energieträger 2015*. Abgerufen am 24. 04 2017 von www.rhein Hessische.de
- Rohlf, W., & Winter, M. (2015). *SCHNELLADUNG VON ELEKTROBUSSEN*. Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe (ISEA) der RWTH Aachen. Sonnenenergie. Von http://www.sonnenenergie.de/sonnenenergie-redaktion/SE-2015-04/Layout-fertig/PDF/Einzelartikel/SE-2015-04-s040-Mobilitaet-Schnellladung_von_Elektrobussen.pdf abgerufen
- Schaarschmidt, M. (24. 04 2017). Einsatz von Erdgasbussen, Erdgas Info. (B. Helsper, Interviewer)
- Schlesinger, D. M. (06 2014). Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. *Projekt 57/12*. (E. G. Prognos AG, Hrsg.) Abgerufen am 24. 04 2017 von https://www.destatis.de/.../Energiepreise/EnergiepreisentwicklungPDF_5619001.pdf
- Schmitz, M. (2014). *Bedeutung alternativer Antriebe im ÖPNV aus Sicht des VDV*. (VDV, Hrsg.) Abgerufen am 26. 09 2016 von Vortrag: www.erneuerbar-mobil.de/de/foerderprogramm/...von.../vov-keynote_schmitz.pdf
- Schraven, S. (2010). *Techno-ökonomische Bewertung induktiver Lademöglichkeiten für Elektrofahrzeuge*. Karlsruhe.
- Siemens. (2015). *eBus-Schnellladlösungen von Siemens*. Abgerufen am 13. Dez. 2016 von <http://www.siemens.com/press/pool/de/events/2015/mobility/2015-06-uitp/presentation-ebus-d.pdf>
- Sileo. (2017). *Elektrobus S10*. Abgerufen am 20. 01 2017 von <http://www.sileo-ebus.eu/>

- Solaris. (2017). Abgerufen am 17. 01 2017 von
https://www.solarisbus.com/vehicle/neuer+urbino+hybrid#goTo|urbino1_scene2
- Solaris. (2017). *Urbino 12 electric*. Abgerufen am 20. 01 2017 von
https://www.solarisbus.com/vehicle/urbino-12-electric#goTo|urbino1_scene2
- Solaris. (2017). *Urbino 8.9 LE electric*. Abgerufen am 20. 01 2017 von
https://www.solarisbus.com/vehicle/urbino-8-9-electric#goTo|urbino1_scene3
- Solaris. (op). Abgerufen am 14. Februar 2014 von <http://www.solarisbus.com/>
- Stadt Hamburg. (2017). <http://www.hamburg.de>. Abgerufen am 09. Mai 2017 von
<http://www.hamburg.de/contentblob/4395188/8de02c53426fe1ac14ec0f120a0233c3/data/bergziege-bild.jpg>
- Stadt Ingelheim a.R. (04. 07 2016). Vergabeverfahren Stadtbusverkehr Ingelheim am Rhein - Leistungsbeschreibung. Ingelheim am Rhein.
- Staubach, T. (24. 04 2017). Informationen zu Panthographen; Schunk GmbH. (B. Helsper, Interviewer)
- Tagesspiegel. (26. 11 2016). *Die Elektro-Busse der BVG fahren weiter*. Abgerufen am 23. 01 2017 von <http://www.tagesspiegel.de/berlin/e-mobility-in-berlin-die-elektro-busse-der-bvg-fahren-weiter/14898716.html>
- Umweltbundesamt. (02. 09 2014). *Lachgas und Methan*. (U. Bundesamt, Herausgeber)
Abgerufen am 29. 09 2014 von <http://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/lachgas-methan>
- Van Hool. (2017). *Public Transport*. Abgerufen am 17. 01 2017 von
<http://www.vanhool.be/DEU/OPNV/Resources/folderPublicTransport.pdf>
- VDL. (2017). *Citea*. Abgerufen am 20. 01 2017 von
<http://www.vdlbuscoach.com/Producten/Openbaar-vervoer/Citea/Citea-range/Citea-Low-Floor-Electric.aspx?lang=de-DE>
- VDL. (2017). *Citea-SLF-120-hybrid*. Abgerufen am 17. 01 2017 von
<http://www.vdlbuscoach.com/Producten/Openbaar-vervoer/Citea/Citea-range/Citea-SLF-120-hybrid.aspx>
- Volvo. (2017). *Volvo Hybrid Buses*. Abgerufen am 06. 01 2017 von
<http://www.volvobuses.com/BUS/INDIA/EN-IN/VOLVOGROUP/ENVIRONMENT/FUEL%20EFFICIENCY/HYBRID/Pages/Specifications.aspx>
- VSG. (2017). *Erdgasfahren*. Abgerufen am 17. 01 2017 von
<http://www.erdgasfahren.ch/fahrzeuge/erdgas-fahrzeuge/beispiele-nutzfahrzeugebusse/>

Wendling, C. (06. 04 2017). Angebot Stromversorgung Depot & Bahnhof, Rheinhessische GmbH. (N. Rauth, Interviewer)

Westdeutscher Rundfunk Köln. (05. Dezember 2016). <http://www1.wdr.de>. Abgerufen am 09. Mai 2017 von <http://www1.wdr.de/nachrichten/westfalen-lippe/Erste-Wasserstofftankstelle-in-Betrieb100.html>

Zukunft Erdgas. (2017). *man lions city cng*. Abgerufen am 17. 01 2017 von <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/erdgas-fahrzeuge/man/man-lions-city-cng/>

Zukunft ERDGAS. (2017). *Scania Citywide*. Abgerufen am 17. 01 2017 von <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/erdgas-fahrzeuge/scania/scania-citywide-lelf/>