

Forschungsbericht BWPLUS

**Wasserstoffmobilität im ÖPNV der Stadt Offenburg und
Umgebung – Konzeptentwicklung, technoökonomische
Analyse und gesellschaftliche Akzeptanz
„H2Bus“**

von

M. Zeller, R. Luise, M. Sikka
Europäisches Institut für Energieforschung

N. Hartmann, H. Kim
Hochschule Offenburg
Institut für Energiesystemtechnik

T. Soylu
Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Verkehrswesen

Förderkennzeichen: BWÖPN18004-18006

Die Arbeiten des Baden-Württemberg-Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre
Sicherung (BWPLUS) werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Dezember 2019

Executive Summary

Für Verkehrsunternehmen stellt die Erprobung neuer Technologien eine große Herausforderung dar. Zum einem müssen sich Verkehrsunternehmen auf die emissionsfreie Mobilität der Zukunft vorbereiten und zum anderen dürfen auch solche Erprobungen die Dienstleistungsqualität nicht gefährden, zum anderen muss weiterhin einen Technologie-offener Betrieb gewährleistet werden.

Sowohl Wasserstoff-Busse als Batterie-Busse können ihren Beitrag zur Umstellung des ÖPNV auf emissionsfreie Mobilität leisten. Je nach Anwendungsmuster können sich beide Technologien gut ergänzen, und zu einem volkswirtschaftlichen Optimum führen. Es gilt, die Technologien im realen Umfeld zu erproben, um praxisnahe Erfahrung zu sammeln und dabei Mitarbeiter auszubilden, ohne die Qualität des Betriebs zu gefährden. Bei der aktuellen Kostenlage sehen beide Technologien ihre Einführung in den Betrieb mit Mehrkosten im Vergleich zu der aktuellen Diesel-Lösung verbunden.

Bei einer Batterie-basierten Lösung mit Pantograph-Schnellladung sind kürzere Linien gute Kandidaten für eine elektrische Umstellung ohne Auswirkungen auf der Größe der Busflotte. Auch Liniensystemen beliebiger Länge mit Knotenpunkten in regelmäßigen Abstände ermöglichen eine gemeinsame Nutzung der Ladeinfrastruktur, und stellen somit reduzierten Aufbaukosten der Ladeinfrastruktur in Aussicht. In diesen Fall sind aber auch Fahrplanmanagement-Aspekte hinsichtlich der Ladezeit am Pantograph mit zu berücksichtigen, die nicht Bestandteil dieser Studie gewesen sind. Allgemein lassen die Kosten-Prognosen für Batterie und Batterie-elektrischen Fahrzeuge eine signifikante Kostenreduzierung bis 2030 erkennen, die in manchen Konfigurationen zur Kostenparität und sogar geringeren Kosten als mit der Diesel-Variante führen würde.

Anders als für Batterie-Busse stellt die Linien-Konfiguration keinen wirtschaftlichen Einflussfaktor auf den Betrieb von Wasserstoff Bussen dar. Die derzeitige Reichweite der H₂-Busse reicht aus um die zu erwartende tägliche Fahrleistung zu decken. Bei der Wasserstoffmobilität sind aber die Versorgungsinfrastruktur und die damit verbundenen Kraftstoffkosten von entscheidender Bedeutung. Ihr Aufbau ist mit hohen Investitionskosten und gesetzlichen Verpflichtungen verbunden (BImSchG, BetrSichV), die für eine erste Erprobung der Technologie im kleinen Maßstab eine Hürde für Verkehrsunternehmen darstellen könnte. Die H₂ Mobility Deutschland bietet die Möglichkeit an, 700 bar Tankstellen mit einem 350 bar Modul zu erweitern, das die tägliche Versorgung von ca. 6 Busse ermöglicht. Mit begrenzten Risiken für die Verkehrsunternehmen bietet es sich daher an, die H₂ Mobilität auf eine limitierten Busflotte zu erproben. Da der Aufbau des H₂-Mobility Deutschland Tankstellennetz eine Lücke in Offenburg und Umgebung aufweist, wäre es vorstellbar an der Errichtung einer solchen Tankstelle zu arbeiten, die die Betankung und Erprobung von Wasserstoff Busse ermöglicht. Auf längerer Sicht ist die Sicherstellung einer gutplatzierten zuverlässigen und nachhaltigen Wasserstoffquelle von entscheidender Bedeutung. Derzeit liegen vorhandenen Wasserstoffquellen in mehr als 100 km Entfernung. Eine Nutzung der Wasserkraft des naheliegenden Rheins erscheint durchaus sinnvoll, sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus umwelt-technischen Gründen (erneuerbarer Strom, Stromkostenreduzierung durch Eigenversorgung, kürzere Transportwege, möglicher Nutzen für die Eurometropole Straßburg).

Es lässt sich festhalten, dass für die Region Offenburg zunächst die Erprobung beider Technologien, der Elektromobilität als auch der Wasserstoffmobilität, empfohlen wird. Es sollte zeitnah in den Erfahrungsaufbau mit beiden Technologien investiert werden. Zudem sollte bei der Elektromobilität das Flottenmanagement untersucht und evaluiert werden und bei der Wasserstoffmobilität die Möglichkeiten der Kooperation für den Aufbau der Wasserstofftankstelle. Im Rahmen der nächsten Ausschreibungsrunde für den öffentlichen Nahverkehr in Offenburg wird empfohlen diesen emissionsfrei auszuschreiben. Es ist absehbar, dass aus Kostengründen (Kostenparität der Elektromobilität mit der Dieselvariante) als auch aus Gründen der Anforderung bzgl. der Emissionsgrenzwerte der ÖPNV emissionsfrei umgesetzt werden sollte.

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	3
Abbildungen.....	7
Tabellen	8
Einleitung	9
1 Strukturanalyse.....	10
1.1 Raumstrukturelle Analyse.....	11
1.1.1 Wohnbevölkerung.....	11
1.1.2 Ein- und Auspendler	12
1.1.3 Schülerverkehr.....	14
1.2 Analyse des bestehenden Angebotes	14
1.3 Ausgewählte Linien.....	15
1.3.1 Erreichbarkeit.....	15
1.3.2 Verlagerungspotential und Erschließungsqualität.....	16
1.4 Fazit.....	17
2 Akzeptanzuntersuchung	18
2.1 Soziodemographie	18
2.2 Aktuelles Verkehrsverhalten.....	18
2.3 Einstellung zu öffentlichen Verkehrsmitteln und Pkw.....	20
2.4 Einstellung zu H2-Bussen	20
3 Analyse einer Wasserstoff-basierten Umsetzung	25
3.1 Wasserstoff im ÖPNV.....	25
3.1.1 Prinzip einer Brennstoffzelle	25
3.1.2 Wasserstoff als Kraftstoff.....	25
3.1.3 BZ-Busse: Stand der Technik	27
3.1.4 BZ-Busse: Hersteller und Produktmerkmale	28
3.1.5 Europäischen Erfahrungen im Rahmen öffentlicher Projekte.....	29
3.1.6 Kostensenkung der Technologie.....	29
3.1.7 Regulatorischer Rahmen für Bushersteller	30
3.1.8 Regulatorischer Rahmen für Busflottenbetreiber und Auftragsgeber: CVD 31	
3.2 Kostenberechnung für eine Wasserstoff-basierte Bus-flotte in Offenburg.....	33
3.2.1 Jährliche Fahrleistung der betrachteten Buslinien	33
3.2.2 Dimensionierung der H2-Busflotte für Stadtbuslinien.....	33
3.2.3 Fahrzeugkosten: Anschaffung und Wartung	34
3.2.4 Gesamtkosten Berechnung (TCO).....	36
3.3 H2-Versorgung	38

3.3.1	CO ₂ -Emissionen	38
3.3.2	Kostenproblematik bei der Wasserelektrolyse.....	39
3.3.3	H2 Mobility Deutschland.....	41
3.3.4	Wasserstoffquellen in der Region	42
3.4	Zusammenfassung	42
4	Analyse einer batterieelektrischen Umsetzung	43
4.1	Gesamtkostenrechnung.....	43
4.2	Literaturrecherche	44
4.2.1	CAPEX.....	44
4.2.1.1	Elektrobus.....	44
4.2.1.2	Kosten des Akkumulators.....	46
4.2.1.3	Ladestation.....	49
4.2.2	OPEX	51
4.2.2.1	Strompreis in Deutschland.....	51
4.2.2.2	Wartungs- und Betriebskosten	52
4.3	Fallbeispiel Offenburg: Betriebsbedingungen	52
4.3.1	Szenario Depotladung	52
4.3.1.1	Buslinieninformationen	52
4.3.1.2	Kostenannahmen.....	53
4.3.2	Szenario Pantograph.....	57
4.3.2.1	Buslinieninformation.....	57
4.3.2.2	Rentabilitätsparameter	58
4.4	Ergebnisse und Diskussion.....	60
4.4.1	Szenario Depotladung	60
4.4.2	Szenario Pantograph.....	62
4.5	Fazit und Ausblick	64
5	Zusammenfassung	65
6	Anhang	67
A.1	Strukturanalyse	68
A.2	Akzeptanz Umfrage: Charakterisierung der Stichprobe.....	77
A.3	Litteraturverzeichnis AP1	78
A.4	Batterieelektrische Umsetzung.....	79

Abbildungen

Abbildung 1 Bevölkerungsentwicklung von 1950 bis 2018.....	11
Abbildung 2 Räumliche Verteilung der Einwohner.....	11
Abbildung 3 Berufspendlersaldo in den Gemeinden Baden-Württembergs	12
Abbildung 4 Abbildung der Quell-Zielrelationen in Ortenaukreis	14
Abbildung 5 Erreichbarkeit der Haltestellen in der Stadt Offenburg	16
Abbildung 6 Erschließung und MIV-Abhängigkeit als Verlagerungspotential.....	17
Abbildung 7 Pkw-Verfügbarkeit nach Raumtyp.....	19
Abbildung 8 Verkehrsmittelwahl bei uneingeschränkter Pkw-Verfügbarkeit.....	19
Abbildung 9 Einstellung zu ÖPNV und Pkw	20
Abbildung 10 Einstellung zu H2-Bussen	22
Abbildung 11 Einsatz von H2-Bussen	22
Abbildung 12 Einsatz von H2-Bussen nach Wege.....	23
Abbildung 13 Einsatz von H2 Bussen nach Wegezweck	23
Abbildung 14: Reformierungsanlage	26
Abbildung 15 PEM Elektrolyse Energiepark Mainz	27
Abbildung 16 Bus O530 BZ	29
Abbildung 17 H2 Busfahrzeuge: Kostendegression.....	30
Abbildung 18 Eurnormen für Busse - Entwicklung der Anforderungen	31
Abbildung 19 Innerstädtischer Busverkehr.....	33
Abbildung 20 Entscheidungslogik des Modells.....	34
Abbildung 21 Kostenprognose für 12m H2 Busse.....	35
Abbildung 22 Vergleich der Gesamtkosten für verschiedenen Linien	36
Abbildung 23 Vergleich Kosten TCO3 (8€/kg H2) vs. Diesel:Linie R301	37
Abbildung 24 CO ₂ Bilanz Busverkehr mit Wasserstoff.....	38
Abbildung 25 Spezifische Kosten einer Elektrolyseanlage (k€/kW)	39
Abbildung 26 Gestehungskosten Wasserstoff als Funktion des Strompreises	40
Abbildung 27 Strompreise für Industrie Stand 07/2019	41
Abbildung 28 H2 Mobility Tankstellen	41
Abbildung 29 Flussdiagramm zum Aufbau des Gesamtkostenmodells	43
Abbildung 30 12 m E-Bus Kosten (Anhang A.2).....	44
Abbildung 31 Bozankaya E-Bus (links), Solaris E-Bus (rechts).....	45
Abbildung 32 Schätzungen der Kosten für Li-Ion-Akkus	47
Abbildung 33 Ergebnisse der BNEF-Preiserhebung für Lithium-Ionen-Batterien, mit Prognose von 2019-2030.....	47
Abbildung 34 Depot-Ladestation (links), Laden über Pantographen (Mitte), kabelloses Laden (rechts).....	49
Abbildung 35 BDEW-Strompreisanalyse 1998-2019 und Änderungen der EDE-Umlage bis 2035 (Anhang A.8).....	51
Abbildung 36 Ergebnisse für 2-Bus-Szenario von Linie S5 und S7 in 2019	60
Abbildung 37 260 kWh Depotladestation, Komponentenanalyse des Basismodellszenarios im Jahr 2019 (links) und im Jahr 2027 (rechts).....	61
Abbildung 38 Ladestation für Pantograph, Grundmodell des TCO-Modellszenarios	62
Abbildung 39 TCO Schätzung für ein 11 Busse Szenario in 2027	63

Tabellen

Tabelle 1 Energiedichten von gängigen Energieträgern	25
Tabelle 2 Elektrolyse: CO ₂ Belastung des H ₂ durch den eingesetzten Strom	26
Tabelle 3 BZ und H ₂ REX Busse: Typische Kenndaten	27
Tabelle 4 Überblick H ₂ -Bus Hersteller in Europa	28
Tabelle 5 Technische Merkmale Citaro O530 BZ / A330	28
Tabelle 6 FCHJU Demo-Projekte für H ₂ -Busse	29
Tabelle 7 Verbindliche Quoten nach CVD	32
Tabelle 8 Kennzahlen Stadtbuslinien, R301 und R106	34
Tabelle 9 Hypothesen für die TCO Berechnung	35
Tabelle 10 Abgebildeten Kostenszenarien	36
Tabelle 11 Kostenvergleich der verschiedenen Szenarien (relativ)	37
Tabelle 12 CO ₂ Bilanz bei der Wasserstoffherzeugung	38
Tabelle 13 Abschreibungskosten Elektrolyseanlage	40
Tabelle 14 H ₂ Quellen in der Region	42
Tabelle 15 Rhein Wasserkraftwerken – Entfernung und installierte Leistung	42
Tabelle 16 E-Bus-Ausfallkosten für drei verschiedene Lademethoden	46
Tabelle 17 Batterie-Realmarktpreis	48
Tabelle 18 Ausfallkosten der Depot-Ladeinfrastruktur für 2015	50
Tabelle 19 Ausfallkosten der Pantograph-Ladeinfrastruktur	50
Tabelle 20 W&B-Kosten für E-Bus und Ladestation	52
Tabelle 21 Buslinieninformation für Linie S5 und S7	53
Tabelle 22 Kostenannahmen Bus	54
Tabelle 23 Kostenannahmen Batterien	54
Tabelle 24 Kostenannahmen: 50kW Depot-Ladestation	55
Tabelle 25 Kostenannahmen: Strompreis	55
Tabelle 26 Kostenannahmen: Wartungs- und Betriebskosten	56
Tabelle 27 Dieselbus OPEX Parameter, Vergleich der Gesamtkostenrechnung	56
Tabelle 28 Dieselbus OPEX Parameter, Vergleich der Gesamtkostenrechnung	56
Tabelle 29 geschätzte Verfügbarkeit der Stadtbuslinien in Offenburg für gelegentliches Laden	57
Tabelle 30 Entfernung und erforderliche Kapazität je Linie pro Jahr	58
Tabelle 31 Pantograph-Laden, E-Bus Kosten	58
Tabelle 32 Batteriekosten in 2027	59
Tabelle 33 relevante Parameter für die Ladestation für Pantographen	59
Tabelle 34 Übersicht der TCO-Szenarien 1-3	60
Tabelle 35 Kostenbestandteile	62

Einleitung

Ziel des Projektes „H2Bus“ ist die Konzeptentwicklung, technoökonomische Analyse und Untersuchung der gesellschaftlichen Akzeptanz einer Wasserstoffinfrastruktur für den öffentlichen Personennahverkehr in der Stadt Offenburg und Umgebung. Aufbauend auf einer Analyse des aktuellen und zukünftigen Mobilitätsverhaltens werden sowohl ein Wasserstoff- und Brennstoffzellen-betriebener ÖPNV als auch eine batterieelektrische Umsetzung analysiert und bewertet. Die Szenarien werden mit den Entscheidungsträgern der Stadt Offenburg diskutiert und mögliche gesellschaftliche Problemstellen identifiziert. Das Projekt soll eine Konzeptstudie liefern, die auch auf andere Städte in Baden- Württemberg übertragen werden kann. Projektpartner sind das EIFER, das KIT, die Hochschule Offenburg sowie die Stadt Offenburg.

1 Strukturanalyse

Die Arbeitsschritte der Strukturanalyse der bestehenden Linien lassen sich für wie folgt allgemein gliedern:

- Literaturrecherche/Stand der Forschung
- Datenerfassung
- Datenaufbereitung
- Datenanalyse
- Ergebnisse

Literaturrecherche / Stand der Forschung

Im Vorfeld wurde, aufbauend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche, der aktuelle Stand der Forschung in den Bereichen wasserstoffbetriebene und elektrische Busse untersucht, um Einblick in die raumstrukturellen und technischen Grundlagen zu erhalten und Analysekonzepte zu entwerfen. Für die Potentialabschätzung mussten Determinanten der Verkehrsnachfrage benannt werden, welche für eine statistische Analyse zum Nachweis ihres Einflusses auf die mögliche Linienführung mit wasserstoffbetriebenen Bussystemen in Frage kämen.

Datenerfassung

Im Bereich der räumlichen Strukturanalyse konnten vorwiegend auf öffentlich zugängliche Daten zurückgegriffen werden (z. B. Regionalpläne, Fahrpläne, Einwohnermeldeämter, OpenStreetMap usw.), welche teilweise von der Stadt Offenburg zur Verfügung gestellt wurde. In die Linienstrukturanalyse gingen in erheblich stärkerem Maße online verfügbare Fahrpläne sowie Haltestelleninformationen aus dem zentralen Haltestellenverzeichnis (zHV) ein. Lediglich die Fahrgastzahlen der Schlüssellinien kamen als unternehmensinterne Daten von TBO (siehe Studie der PTV zur Fahrgastzahlen) hinzu. Darüber hinaus wurden Daten zur Verkehrsnachfrage (motorisierter Individualverkehr - MIV) in Offenburg und Umgebung aus einem deutschlandweiten Verkehrsnachfragemodell (VALIDATE) in die Analyse einbezogen.

Datenaufbereitung und Datenanalyse

Die Aufbereitung und Analyse der Daten (Raumstrukturanalyse, Linienanalyse) erfolgte größtenteils im Geographischen Informationssystem (GIS). Die bereits mit Raumbezug versehenen Daten wurden mit weniger Aufwand in das GIS importiert. Dementsprechend wurden die Daten ohne Raumbezug extern aufbereitet (Georeferenzierung, Konvertierung usw.) und in GIS importiert. Die Verkehrsnachfragedaten wurden mit dem Programm PTV VISUM aufbereitet und analysiert. Zu diesem Zweck wurden die Nachfrage- und Netzdaten aus dem deutschlandweiten Modell explizit für das Untersuchungsgebiet (Offenburg und Umgebung) exportiert und zur weiteren Analyse im GIS aufbereitet.

Ergebnisse

Ausgehend von der oben beschriebenen räumlichen Strukturanalyse entstand ein Synthesemodell, das die bisherigen Ergebnisse zusammenfasst und die Erfassung der möglichen Buslinien mit wasserstoff- und batterieelektrischem Antrieb ermöglicht.

1.1 Raumstrukturelle Analyse

Die starke Abhängigkeit des Verkehrs von der Siedlungsstruktur ist eine bekannte Tatsache. Die raum- und siedlungsstrukturellen Kriterien beeinflussen den Verkehrsbedarf unterschiedlich stark. In diesem Abschnitt werden die räumlichen Strukturmerkmale der Stadt Offenburg kurz vorgestellt.

1.1.1 Wohnbevölkerung

Offenburg ist mit rund 60.000 Einwohnern die größte Stadt des Ortenaukreises und ist als Oberzentrum innerhalb der Region Südlicher Oberrhein zentralörtlich gegliedert.

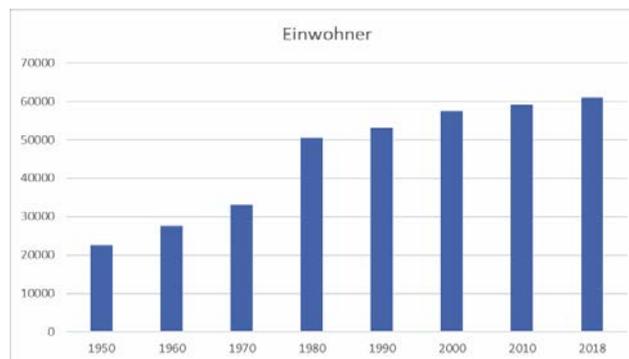


Abbildung 1 Bevölkerungsentwicklung von 1950 bis 2018

(Quelle: Stadt Offenburg, Kommunale Statistikstelle)

Die räumliche Verteilung der Bevölkerung auf die Stadtviertel zeigt ein typisches Bild von Siedlungen mit hoher Dichte im Zentrum und relativ geringer Dichte in der Peripherie.

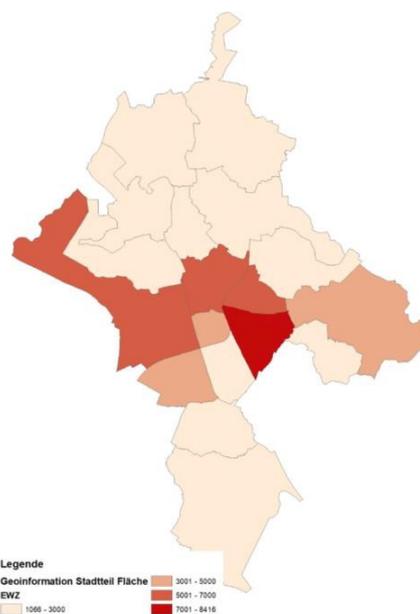


Abbildung 2 Räumliche Verteilung der Einwohner

(Quelle: Eigene Darstellung, Geoinformation Stadt Offenburg und Stabstelle Stadtentwicklung)

Der Stadtteil Südoststadt hat mit rund 8500 Einwohnern die höchste Einwohnerzahl, gefolgt von Weststadt und Nordoststadt mit jeweils fast 6500 Einwohnern. Etwa ein Drittel der Bevölkerung in der Stadt Offenburg ist zwischen 18 und 45 Jahre alt. Ein weiteres Drittel ist zwischen 45 und 65 Jahre alt. 22 % der Gesamtbevölkerung sind älter als 65 Jahre und rund 16.5 % sind zwischen 0 und 18 Jahre alt. In der Stadt Offenburg sind rund 67 % der Haushalte (insgesamt 30.264) 1 und 2 Personen Haushalte, wobei in der Kernstadt deren Anteil am höchsten ist.

1.1.2 Ein- und Auspendler

Ein wichtiger Indikator, der die räumlichen Strukturverhältnisse in einer relativ einfachen Art und Weise erklärt, ist der Ein- und Auspendlersaldo. Als Sitz einer Vielzahl von überregional bedeutsamen Klein- und Mittel- sowie Großunternehmen erzeugt die Stadt Offenburg vor allem durch Pendler Verkehrsachse. Laut Berufspendlerrechnung des Statistisches Landesamt Baden-Württemberg weist die Stadt Offenburg ein Einpendlerüberschuss auf (siehe Abbildung 3)

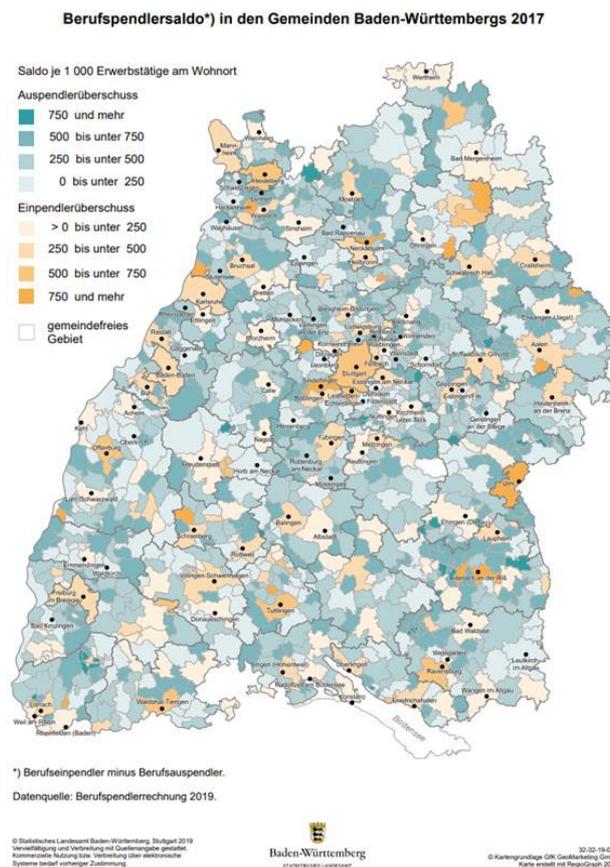


Abbildung 3 Berufspendlersaldo in den Gemeinden Baden-Württembergs

(Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg)

Da es keine aktuellen Statistiken über Modal-Split der Pendler in Offenburg und deren räumliche Feinverteilung gibt, wurde über die Raumstrukturkriterien Quell- und Zielverkehr einbezogen, indem die Bevölkerungsstruktur den Quellverkehr, die Attraktivität (Proxyvariable für die Anzahl der Arbeitsplätze) v.a. den Zielverkehr beschreiben.

Das Verkehrsmodell VALIDATE ist ein kalibriertes Modell, welches Pkw- und Lkw-Belastungen für das gesamte deutsche Hauptstraßennetz liefert. Das VALIDATE Modell besteht aus:

- einem attribuierten Netzmodell des Hauptstraßennetzes,
- den Verkehrsmengen und damit der Nachfrage (Werktägliche typische Nachfragematrizen Dienstag – Donnerstag) für Pkw- und Lkw und
- der Umlegung der Nachfrage auf das Netz.

Das Netz von VALIDATE ist aus einem digitalen (NAVTEQ) Straßennetz abgeleitet. Es besteht aus ca. 2 Millionen Knoten, ca. 120 Millionen Links (= Netzelemente) und 10193 Verkehrszellen (Für Berlin und Umland ca. 450). Das Modell ist kalibriert. Das Verkehrsverhalten bzw. die Verkehrsnachfrage wurden aus den MiD-Daten abgeleitet. Die daraus resultierenden Nachfragematrizen wurden mit den Daten (anhand der gezählten Querschnittbelastungen DTVw) aus 70.000 Zählstellen kalibriert. Anschließend wird diese Verkehrsnachfrage auf das Netz mittels der Verkehrsmodellierungssoftware VISUM umgelegt. Infolge dieser Umlegung liegen Informationen über Routenwahl zwischen Quell- Ziel-Relationen und stündliche sowie (werk-)tägliche Belastungen vor.

Nach der Umlegung liegt eine Nachfrage für ca. 8 Millionen Relationen vor, die deutschlandweit genutzt werden. Jede einzelne Relation verfügt über Informationen der benutzten Routen, welche aus mehreren Knoten und Kanten bestehen. Mittels einer streckenfeinen Auflistung der Relationen im VISUM ist es möglich die einzelnen Routenverläufe auf Knotenebene, d.h. von Knoten zu Knoten, darzustellen. Unter Nutzung des VALIDATE Modells erfolgt eine streckenfeine Abbildung der Umlegung, welche alle relevanten Quell-Ziel-Relationen (= Verkehrsnachfragematrix) und deren Routen auflistet.

Da der Verkehr immer zielgerichtet und zweckgebunden ist, können aus der Abbildung 4 Schlussfolgerungen über die Aktivitätsziele in Offenburg und Umgebung gezogen werden. Mit über 20.000 Fahrten am Tag (rot markiert) ist die Stadt Offenburg selbstverständlich eine der wichtigsten Verkehrserzeuger in der Region. Zudem sind Kehl, Achern sowie Lahr weitere Quellen für Quell- und Zielverkehr in der Region.

Darüber hinaus zeigen die Pendlerverflechtungen (schwarze Balken), dass der größte Teil der Pendler zwischen benachbarten Städten pendelt. Der Anteil der Pendler, die weit über die Gemeindegrenzen hinaus Pendeln, ist im Vergleich geringer.

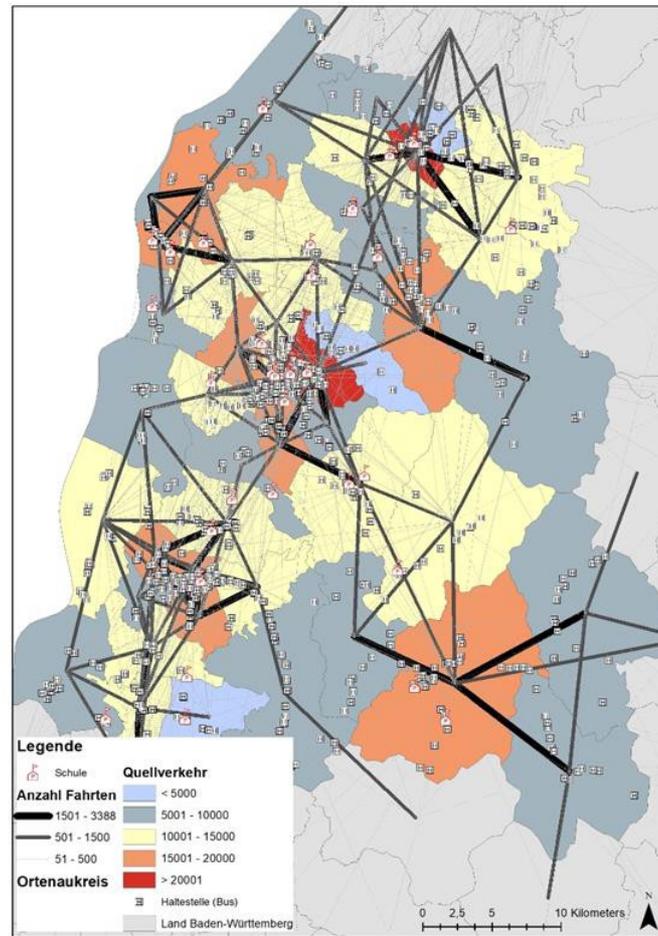


Abbildung 4 Abbildung der Quell-Zielrelationen in Ortenaukreis

(Quelle: Eigene Darstellung, VALIDATE)

1.1.3 Schülerverkehr

In Offenburg sind rund 11 % der Wohnbevölkerung zwischen 6 und 18 Jahre alt. Die wichtigsten Zielorte für den Schülerverkehr aus der Stadtteilen Offenburg sind Stadtmitte, Nord- und Nordstadt sowie Südweststadt (siehe Abbildung 4). Diese müssen von sämtlichen Stadtteilen erreichbar sein. Darüber hinaus ist die Hochschule Offenburg mit über 4.500 Studierende eine der weiteren Zielorte für den Verkehr.

Wie aus Abbildung 4 und den Fahrplänen hervorgeht, bietet das Stadtbusnetz im Allgemeinen ein bedarfsgerechtes Angebot (zumindest aus Sicht der Erreichbarkeit). Eine große Anzahl von Schulen kann mit direkter Busanbindung erreicht werden. Da jedoch keine Informationen über den Schüleranteil an den Fahrgastzahlen vorlagen, ist eine quantifizierte Aussage über den beförderten Schülern nicht möglich.

1.2 Analyse des bestehenden Angebotes

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Analyse des bestehenden Angebotes der Linien im Stadtverkehr in Offenburg und im Umland. Diese werden aktuell im Auftrag von der SWEG (Südwestdeutsche Verkehrsaktiengesellschaft) und der DB RVS Regionalbusverkehr

Südwest GmbH gefahren. Die Bestandsanalyse umfasst das Stadtgebiet Offenburg und seine Umgebung. Es wurden die Linien der SWEG sowie der Südwestbus erfasst. Die Datengrundlage für die Analyse waren Datenauszüge aus des zentralen Haltestellenverzeichnisses (zHV) und einzelne Fahrpläne der oben erwähnten Linien. Die Bestandsanalyse folgte die folgenden Schritte:

- Bearbeitung der Daten aus zHV: Konvertierung der csv Tabellen (Informationen über Haltestellen hinsichtlich der Koordinaten, Betreiber, Name...) in GIS Format.
- Digitalisierung der bestehenden Fahrpläne (in pdf Format): Konvertierung der pdf Tabellen in Tabellenformat
- Zusammenfügen der Haltestellen und Fahrpläne in GIS: Zuordnung der Haltestellen bzw. Linien zu den jeweiligen Fahrplänen

Da die Daten zur aktuellen Linienverlauf auf dem Straßennetz nicht zur Verfügung standen, wurden diese zusätzlich durch Digitalisierung der Haltestellen und Fahrpläne generiert.

Die Bedienhäufigkeiten der Linien wurden aus den digitalisierten Fahrplänen abgeleitet,

d.h. Anzahl der Fahrten pro Wochentag/Wochenende wurden zwischen den Haltestellen aggregiert dargestellt. Dies bedeutet, dass die Fahrlängen der Linien zeitlich differenziert (Fzg. Km/Tag/Woche/Jahr) dargestellt werden können. Diese Informationen bilden den Kern der weiteren Analysen. Die einzelnen Liniennetze sind im Anhang A-1 dargestellt. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass diese Abbildungen nicht den tatsächlichen Linienverlauf im Betrieb entsprechen, sondern nur die lineare Verbindung zwischen den Haltestellen darstellen. Sie dienen jedoch dazu, die Linien entsprechend räumlich abzubilden.

1.3 Ausgewählte Linien

Nach einer Bewertung der hier vorgelegten, detaillierten Analyse der Merkmale der Strukturen, ergeben sich folgende Bewertungskriterien für die Auswahl der Linien mit wasserstoff- und batterieelektrischem Betrieb:

- Erreichbarkeit
- Verlagerungspotential
- Erschließungsqualität

1.3.1 Erreichbarkeit

Erreichbarkeit kann sowohl als ein räumliches als auch als ein soziales, ökonomisches, psychologisches oder gesetzliches Phänomen betrachtet werden. Erreichbarkeit ist hier als Lagegunst einer Raumeinheit bzw. eines Standortes definiert. Die Analyse der Lagegunst von Standorten erfolgt in der Nahverkehrsplanung vor allem zur Bewertung der Güte von Verkehrssystemen. In diesem Zusammenhang wurde hier die Erreichbarkeit durch das Konzept der einfachen Erreichbarkeit abgebildet, d.h. Erreichbarkeit als Lagegunst eines Standortes impliziert immer einen relativen Nutzen für Haushalte oder Unternehmen an diesem Standort. Zudem ist die Erschließungs- und Verbindungsqualität des

Verkehrssystems ausschlaggebend. Hier wurde der Anteil der Bevölkerung, der innerhalb

eines bestimmten Radius der Haltestellen lebt verwendet, um die Erreichbarkeit zu bestimmen.

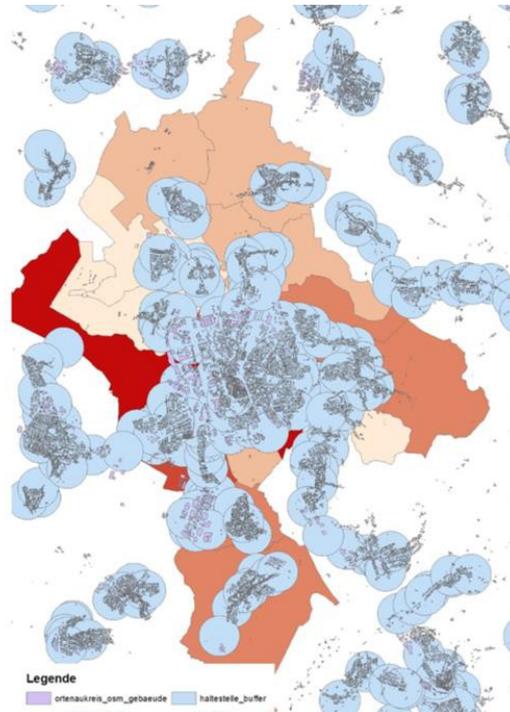


Abbildung 5 Erreichbarkeit der Haltestellen in der Stadt Offenburg

(Quelle: Eigene Darstellung, OpenStreetMap, zHV)

Nach dem einfachen Erreichbarkeitsindikator befinden sich fast alle Stadtteile in Offenburg und Umgebung innerhalb eines 500 m Radius von einer Haltestelle.

1.3.2 Verlagerungspotential und Erschließungsqualität

Aus Bevölkerungssicht bemisst sich die Attraktivität des ÖPNV-Angebots hauptsächlich an der Erschließungs- und Verbindungsqualität des ÖPNV-Systems. Das Konzept der Verkehrsverlagerung beruht generell auf der Idee, Verkehrsnachfrage vom motorisierten Individualverkehr (MIV) auf den ÖPNV und/oder den nicht-motorisierten Verkehr zu verlagern.

Maßnahmen zur Verkehrsverlagerung basieren meist auf der Kombination Push & Pull: Verkehrsteilnehmerinnen und Verkehrsteilnehmer werden eben dann zu einem Wechsel des Verkehrsmittels bewegt, wenn der Nutzen bei Wahl der umweltverträglicheren bzw. gesamtgesellschaftlich sinnvolleren Alternative den Nutzen bei Wahl des eigenen Pkw übersteigt. Maßnahmen, die die Attraktivität von ÖPNV oder Fahrrad steigern, „ziehen“ somit Nachfrage vom MIV ab (= Pull). Umgekehrt kann der MIV durch geeignete Maßnahmen (wie z. B. Tempo-30-Zonen und Parkraumbewirtschaftung) weniger attraktiv gestaltet werden (= Push).

Ansätze zur Verkehrsverlagerung stoßen überall dort an Grenzen, wo einzelne Etappen der typischen Wegeketten besonders Pkw-abhängig sind. Umgekehrt können Maßnahmen, die die Pkw-Nutzung für einzelne Wegeketten-Etappen unattraktiver machen (wie z. B.

konsequente Parkraumbewirtschaftung im Zentrum), auch die Verkehrsmittelwahl der vorgelagerten Etappen in Richtung ÖPNV beeinflussen.

In diesem Zusammenhang wurden der Grad der MIV-Abhängigkeit und die Erschließungsqualität als ausschlaggebende Kriterium für das Verlagerungspotential herangezogen.

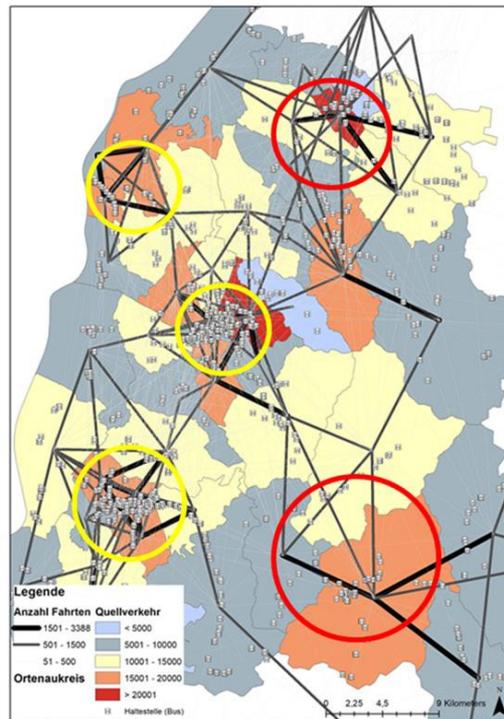


Abbildung 6 Erschließung und MIV-Abhängigkeit als Verlagerungspotential

(Quelle: Eigene Darstellung, VALIDATE, OpenStreetMap, zHV)

Wie aus der Abbildung 6 hervorgeht, besitzen manche Ortsteile in Offenburg und Umgebung Verlagerungspotential. Die rot markierten Bereiche weisen eine hohe MIV- Abhängigkeit (hohes Verkehrsaufkommen) und einen relativ schlechten Erschließungsgrad auf. Die gelb markierten Bereiche haben ebenfalls ein sehr hohes Verkehrsaufkommen, gleichzeitig aber einen guten Erschließungs- und Erreichbarkeitsgrad. In diesem Zusammenhang wäre es sinnvoll, die Linien, die in den gelb markierten Bereichen verkehren, auf Wasserstoff und batterieelektrischen Antrieb umzustellen.

1.4 Fazit

Zusammenfassend kommt dieses Arbeitspaket zu folgendem Ergebnis: ausschlaggebende Merkmale für die Auswahl der geeigneten Linien sind die jährlichen Fahrleistungen der Linien (dadurch u.a. Reduzierung der Schadstoffemissionen möglich), Linienführung durch die Innenstadt (leise und saubere Fahrt) sowie die höhere Fahrgastanzahl. Hierdurch wären insbesondere die Stadtbuslinien (S1 bis S9) sowie die Regionallinien (R106, R301) empfehlenswert für den Betrieb mit Wasserstoff und batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen.

2 Akzeptanzuntersuchung

Neben der Auswertung verschiedener strukturellen Merkmalen der Stadt Offenburg sind auch die Kenntnisse der in der Region wohnhaften Bevölkerung eine wichtige Informationsquelle, wenn es um die Erkenntnisse zur Akzeptanz der wasserstoff- und batterieelektrischbetriebenen Bussystemen geht. Der Einsatz solcher Fahrzeugen wird in den letzten Jahren sowohl in der Wissenschaft als auch in Politik und Gesellschaft breit diskutiert. Jedoch die stellen zum aktuellen Zeitpunkt noch ein unbekanntes Verkehrsmittel in der Bevölkerung dar. Nur wenige haben ein solches bereits getestet bzw. beobachtet.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden durch Online- und CATI- sowie Vor-Ort-Befragungen die Vorkenntnisse der wasserstoff- und batterieelektrischbetriebenen Busse, die Akzeptanz und die Nutzungsintention untersucht. Zudem soziodemographische Merkmale und das aktuelle Verkehrsverhalten abgefragt, um Einflussfaktoren für die Akzeptanz und eine mögliche spätere Nutzung zu identifizieren. Insgesamt nahmen 150 Personen an der Befragung teil.

Der Konzeption des Fragebogens liegt eine ausführliche Literaturrecherche zugrunde, die sowohl Grundlagen der Akzeptanztheorie als auch bisherigen Befragungen im Rahmen von ÖPNV-Untersuchungen am KIT-IfV umfasst. Im Folgenden wird der Aufbau des Fragebogens und die Auswertungen genauer erläutert.

2.1 Soziodemographie

Der erste Teil der Befragung beinhaltet Fragen zur Soziodemographie einer Person wie beispielsweise Alter, Geschlecht, Wohnort, Haushaltsgröße, Nettoeinkommen und beruflicher Status. Bisherige Studien erzielten unterschiedliche Ergebnisse bezüglich des Einflusses soziodemographischer Variablen: teils hatte das Alter einen signifikanten Einfluss, teils das Geschlecht (siehe Anhang A-2). Diese Indizien bekräftigen den Untersuchungsbedarf der soziodemographischen Variablen als Einflussgrößen auf die Akzeptanz.

2.2 Aktuelles Verkehrsverhalten

Der zweite Teil befasst sich mit dem aktuellen Verkehrsverhalten einer Person. Hierbei werden Rahmenbedingungen wie Führerscheinbesitz, Pkw-Verfügbarkeit sowie die Nutzungshäufigkeit verschiedener Verkehrsmittel erfragt. Nach Kim et al. (2005) ist das aktuelle Verhalten einer der besten Prädiktoren für zukünftiges Verhalten. Venkatesh et al. (2012) bildeten dies in der „unified theory of acceptance and use of technology“ (UTAUT) durch das Konstrukt Gewohnheit (engl. habit) ab. Im Kontext wasserstoffbetriebener Busse (H₂-Busse) im ÖPNV wird insbesondere ein Zusammenhang zwischen der Akzeptanz der H₂-Busse und der heutigen Nutzung des ÖPNV vermutet, da die Nutzung der H₂-Busse dem aktuellen Verhalten ähneln würde.

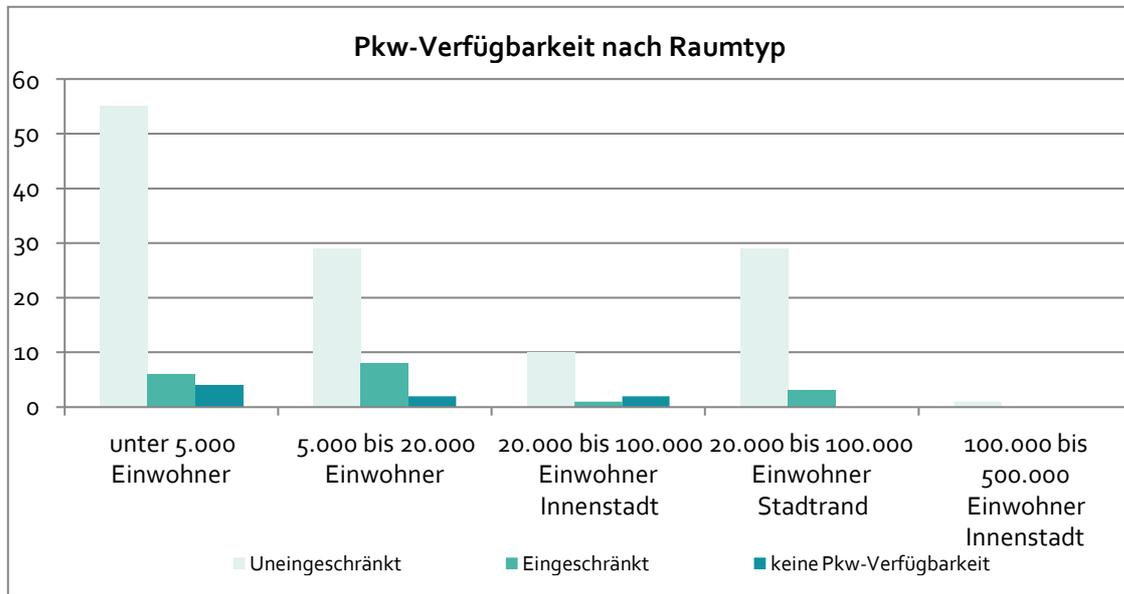


Abbildung 7 Pkw-Verfügbarkeit nach Raumtyp

Insgesamt steht rund 83 % der Befragten uneingeschränkt ein Pkw zur Verfügung und es wird fast täglich benutzt. Die Nutzungshäufigkeit des öffentlichen Verkehrs bei uneingeschränkter Pkw-Verfügbarkeit ist leider sehr gering (alle 2-3 Monate bis fast nie). Fahrrad dahingegen wird fast täglich bzw. an 1-3 Tagen pro Woche benutzt (siehe Abbildung 8).

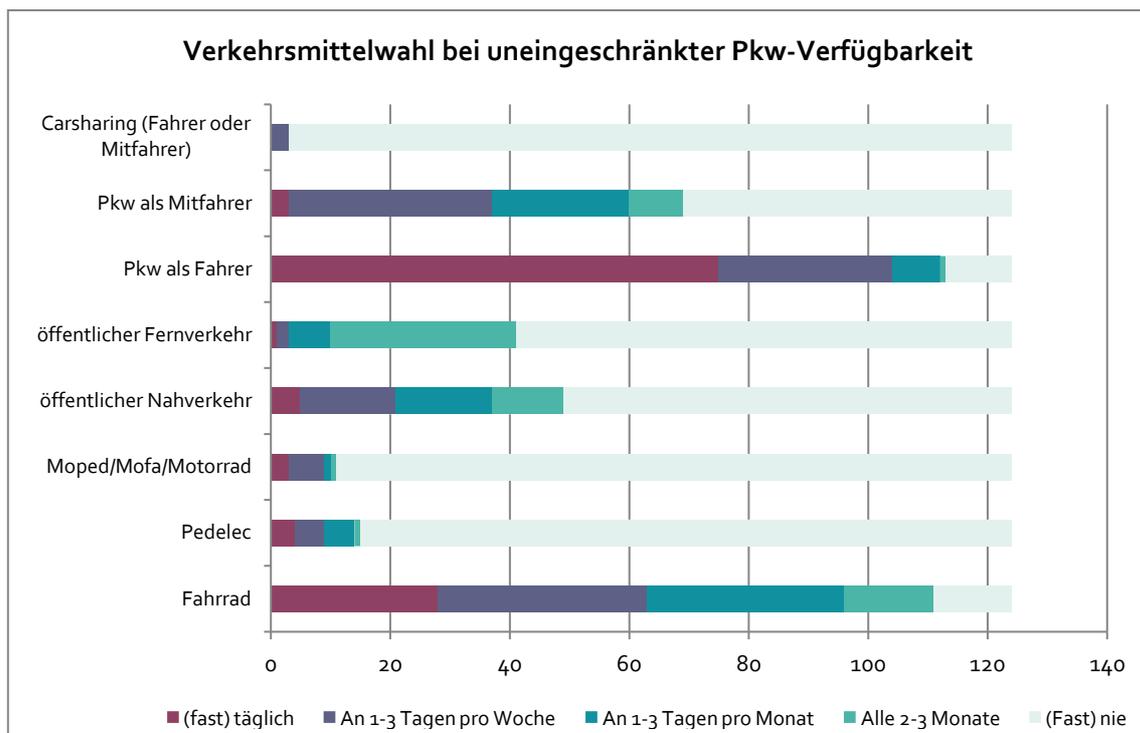


Abbildung 8 Verkehrsmittelwahl bei uneingeschränkter Pkw-Verfügbarkeit

2.3 Einstellung zu öffentlichen Verkehrsmitteln und Pkw

Bisherige Ergebnisse im Bereich der Akzeptanzforschung zeigen insbesondere bei neuen Technologien einen starken Zusammenhang zwischen der persönlichen Einstellung und der Nutzungsintention auf. Zudem ist bekannt, dass Verhalten und Einstellungen sich gegenseitig bedingen (Kroesen et al. 2017), man aber aus Informationen zum Verhalten nicht unbedingt auf die Einstellung schließen kann (Lucke 1995). Aufgrund dessen werden im Fragebogen eine Vielzahl an einstellungsbezogenen Items abgefragt, um insbesondere die Einstellung zum ÖPNV sowie zum Pkw zu ergründen. Hierfür werden unter anderem der soziale Einfluss und die Relevanz von Umweltschutz bei der Verkehrsmittelwahl, das Wohlbefinden im Pkw, das Wohlbefinden im ÖPNV und die Machbarkeit der Wege mit den jeweiligen Verkehrsmitteln untersucht. Es wird vermutet, dass sich heute wahrgenommene Vorteile des ÖPNV – beispielsweise der Umweltschutz oder die Tatsache, sich nicht auf den Verkehr konzentrieren zu müssen – auf die Einstellung zu den H₂-Bussen auswirken können. Alle Aussagen werden auf einer Likert-Skala von 1 = „Trifft voll zu“ bis 5 = „Trifft gar nicht zu“ bewertet. Zudem gibt es die Antwortmöglichkeit „Ich weiß nicht“, um neutrale Haltungen von Unwissenheit zu trennen.

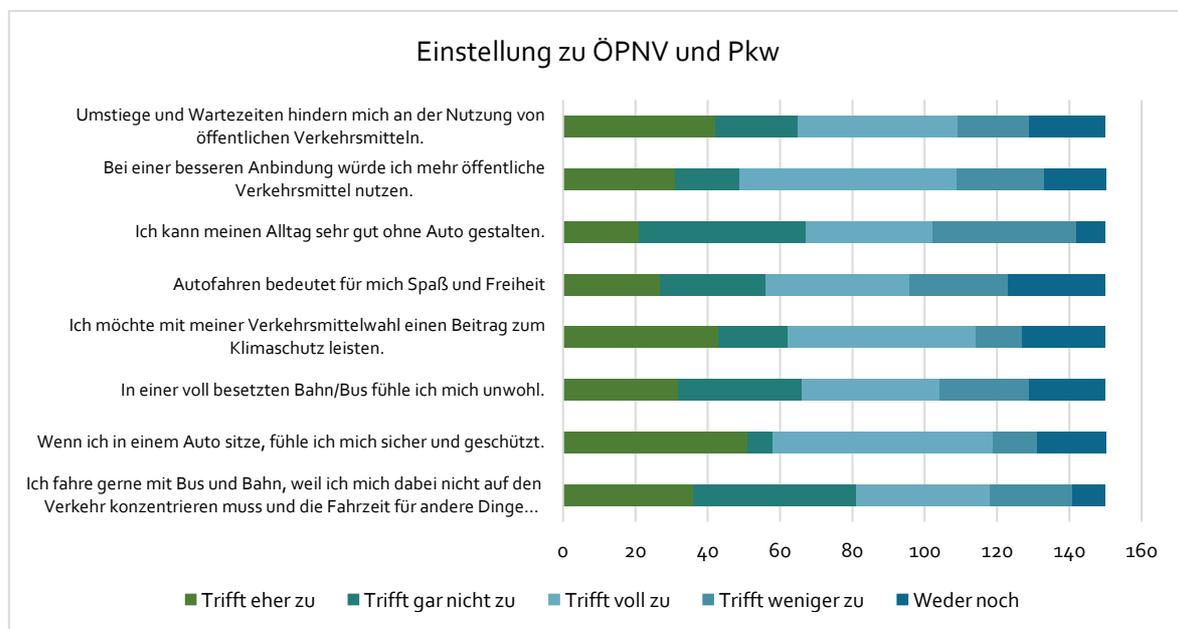


Abbildung 9 Einstellung zu ÖPNV und Pkw

2.4 Einstellung zu H₂-Bussen

Der Hauptteil des Fragebogens befasst sich mit H₂-Bussen. Diese werden während der Befragung eingeführt, um einheitliches Grundwissen bezüglich der neuen Technologie voraussetzen zu können. Bereits in der Theory of Reasoned Action (TRA) nach Fishbein und Ajzen (1975) wird die Bedeutung der Einstellung zum Verhalten für das eigentliche Verhalten aufgezeigt. Da sich die TRA in vielen Bereichen der Verhaltensentscheidungen bewährt hat, wird auch für H₂-Busse vermutet, dass die Einstellung zur Nutzung die Nutzungsabsicht beeinflusst.

Es folgen Aussagen zu folgenden verschiedenen Konstrukten, die ebenfalls auf der Likert-Skala von 1 = „Trifft voll zu“ bis 5 = „Trifft gar nicht zu“ bewertet werden.

Erwarteter Aufwand

Dieses Konstrukt leitet sich aus der UTAUT ab (Venkatesh et al. 2003). Der erwartete Aufwand umfasst sowohl das Erlernen der Bedienung des Systems als auch den Aufwand für Buchung und Bezahlung. Madigan et al. stellten einen signifikanten Einfluss des erwarteten Aufwands auf die Nutzungsintention fest (2016).

Erwartete Leistung

Osswald et al. (2012, S. 4) definierten die erwartete Leistung im Pkw-Technologie-Kontext als „Grad, zu dem ein Fahrer glaubt, dass die Verwendung des Systems hilft, seine Ziele bei der Fahrleistung zu erreichen“. Verschiedene Personen können verschiedene Ziele haben, beispielsweise sicher und schnell am Ziel anzukommen, weniger im Stau zu stehen oder ressourcensparsam zu verreisen.

Sozialer Einfluss

Einer der ältesten Prädiktoren für das Verhalten von Personen ist der soziale Einfluss. Seit der Definition der TRA (Fishbein und Ajzen 1975) wird dieses Konstrukt in verschiedensten Modellen der Akzeptanzforschung berücksichtigt.

Hedonistische Motivation

Hedonistische Motivation ist definiert durch „den Spaß bzw. das Vergnügen, das sich aus der Nutzung einer Technologie ergibt“ (Venkatesh et al. 2012, S. 161). Da die Nutzung der Fahrzeuge eine freiwillige Entscheidung ist, benötigen zukünftige Fahrgäste eine intrinsische Motivation. Eine Möglichkeit hierfür ist die Freude an der Fahrt mit einem H₂- Bus.

Umweltschutz

Eine weitere intrinsische Motivation für die Nutzung der H₂-Busse könnten Umwelt- und Ressourcenschonung sein. Aufgrund des elektrischen Antriebs und der gemeinsamen Nutzung durch mehrere Mitfahrer bieten H₂-Busse hierfür eine gute Möglichkeit.

Erwartete Sicherheit

Die erwartete Sicherheit ist definiert durch den Grad des Vertrauens, den der Nutzer in das Fahrzeug bzw. die Technologie hat und ist angelehnt an das car technology acceptance model (CTAM) (Osswald et al. 2012). Sie äußert sich beispielsweise in der Einschätzung des Unfallrisikos. Nach Alessandrini (2016, S. 24) ist die Sicherheit kritisch für die Akzeptanz der Busse.

Nutzungsintention und Rahmenbedingungen

Die Nutzungsintention wird für diverse Einsatzformen abgefragt, um gegebenenfalls favorisierte Einsatzformen zu identifizieren (Bewertung erfolgt auf einer Likert-Skala von 1 bis 5). Anschließend werden die Probanden gebeten, die Nutzungswahrscheinlichkeit für verschiedene Wegezwecke bzw. den Ersatz für aktuell genutzte Verkehrsmittel zu bewerten.

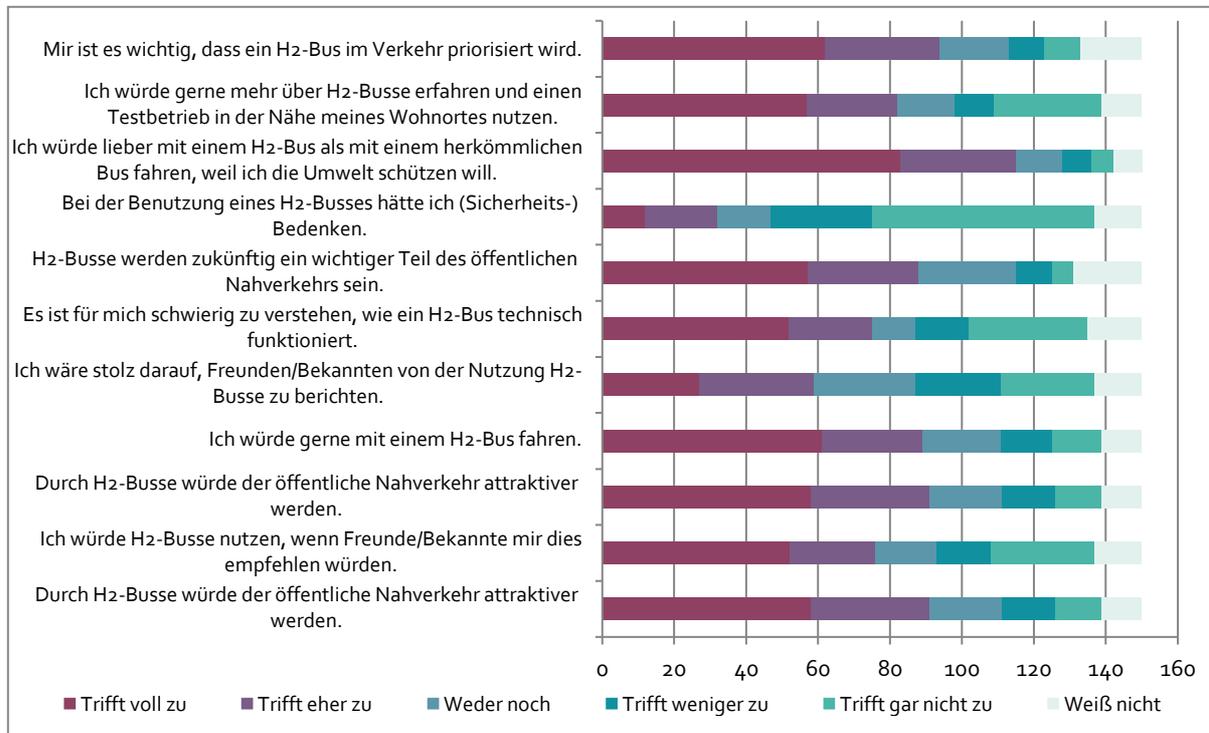


Abbildung 10 Einstellung zu H2-Bussen

Insgesamt fiel die Bewertung der H2-Bussen sehr positiv aus. Wie in Abbildung 10 ersichtlich, bewertet ein Großteil der Befragten H2-Busse als zukunftsfähige, umweltfreundliche und attraktive Verkehrsmittel. Darüber hinaus äußerten die Befragten, dass sie gerne mit H2-Bussen fahren würden und diese als umweltfreundliches Verkehrsmittel ansehen und stolz darauf wären diese nutzen zu können.

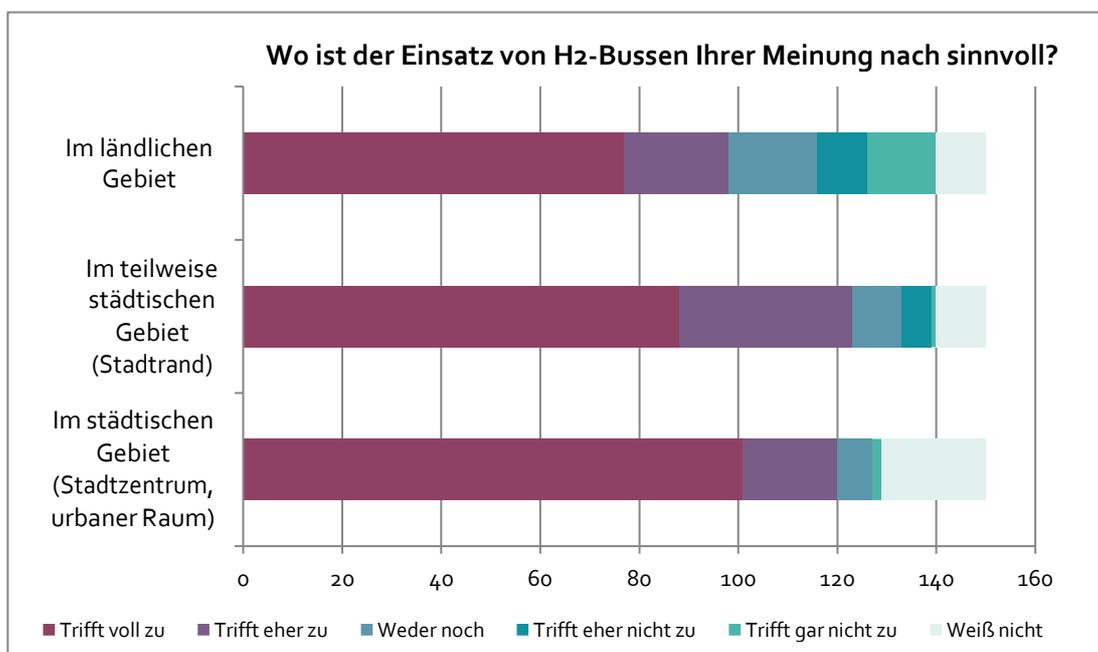


Abbildung 11 Einsatz von H2-Bussen

Zwar sehen die Befragten den Einsatz der H2-Busse in allen 3 Raumtypen als überwiegend sinnvoll an, präferieren aber deren Einsatz eher im städtischen Gebiet. Die Befragten könnten sich insbesondere vorstellen, den H2-Bus unter gleichen Rahmenbedingungen wie etwa heutigen ÖPNV-Wege zu nutzen. Der Einsatz von heutigen Taxi- oder Motorradwegen ist eher unwahrscheinlich. Analysiert man die möglichen Einsatzgebiete nach Wegezweck, so erhalten unerwarteterweise unregelmäßige Wege wie Freizeit den höchsten Zuspruch. Darüber hinaus können sich die Befragten eine Nutzung auf regelmäßigen Wege wie Pendelwege zur Arbeit oder auf Servicewegen vorstellen. Weniger können sich die Befragten eine Nutzung auf Dienstreisen und Ausbildungswegen vorstellen.

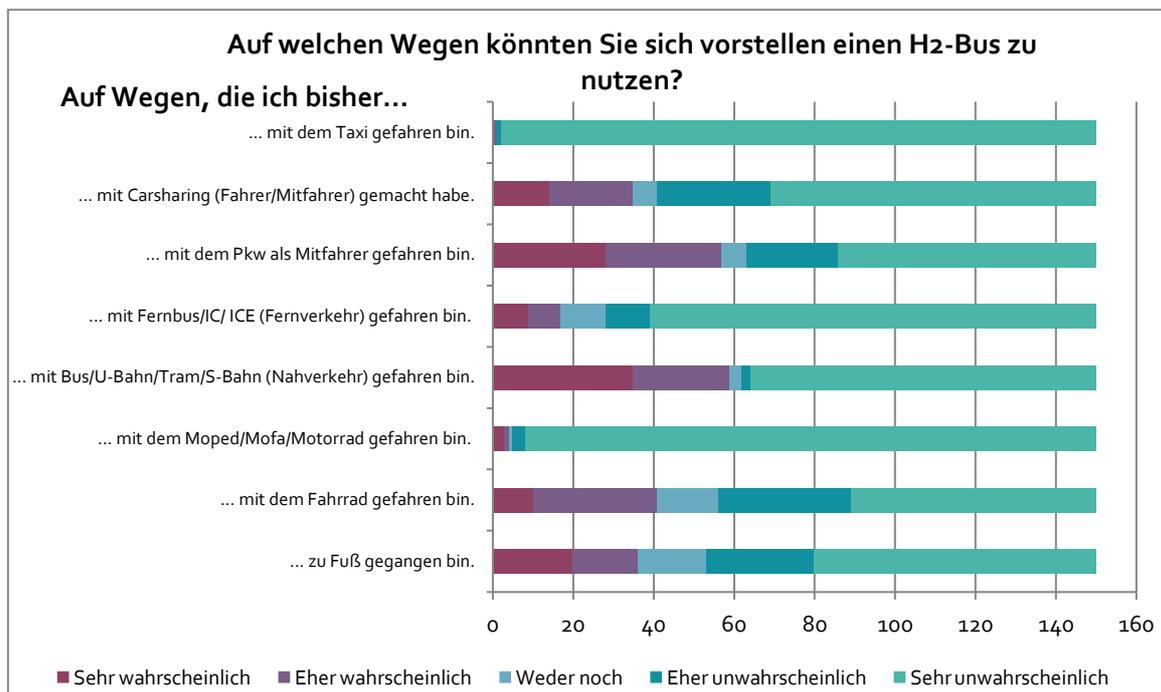


Abbildung 12 Einsatz von H2-Bussen nach Wege

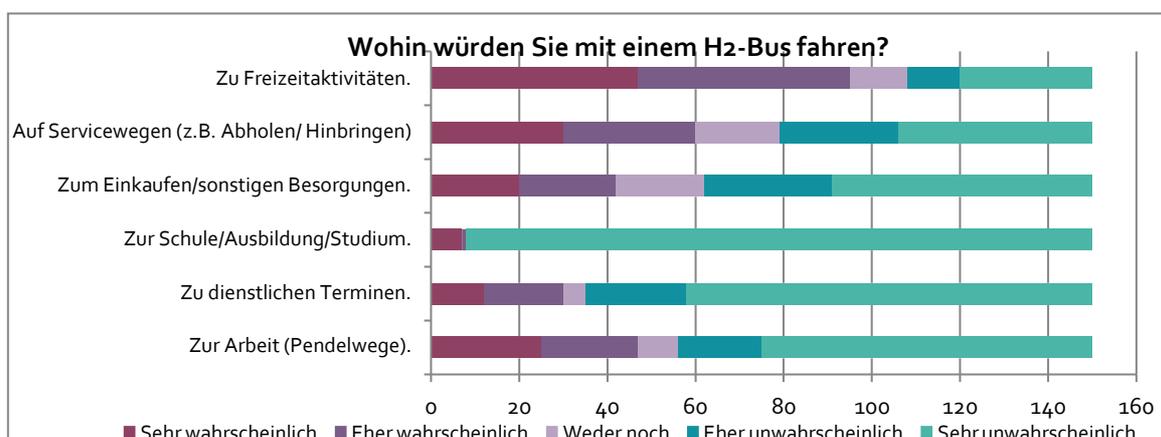


Abbildung 13 Einsatz von H2 Bussen nach Wegezweck

Aus den Freitextkommentaren zu Chancen und Risiken der H₂-Busse lässt sich als deutlichste wahrgenommene Chance von den Befragten (rund 80%) der positive Effekt auf die Umwelt nennen, der im Sinne von Schadstoffarmut, Geräuscharmheit und CO₂-Minderung verbalisiert wurde. Bei den Risiken gab eine große Mehrheit der Befragten an diese nicht zu kennen bzw. abschätzen zu können, rund 10% gaben aber das Thema Sicherheitsbedenken (Explosionsgefahr) an. Zusammenfassend lässt sich damit sagen, dass H₂-Busse bei den Befragten eine hohe Akzeptanz zu genießen scheinen und viele positive Effekte damit in Verbindung gebracht werden und ein Ansatz auf den existierenden Linien begrüßt werden würde. Eine begleitende Information bzw. Aufklärung der Fahrgäste in puncto Sicherheit der neuen Technologie scheint empfehlenswert.

3 Analyse einer Wasserstoff-basierten Umsetzung

3.1 Wasserstoff im ÖPNV

Wasserstoff im ÖPNV wird seit dem Anfang der 2000er Jahre erprobt. Im Rahmen nationaler und europäischer Forschungs- und Demonstrationsprojekte sind derzeit über 200 H₂- Busse europaweit im Einsatz. Auch im Bereich der Personenzüge wird der Wasserstoffantrieb derzeit erprobt und kommerziell eingesetzt. Wasserstoff-Fahrzeuge ähneln oder sind zum Teil elektrische Fahrzeuge: sie verfügen über einen elektrischen Antrieb und eine Batterie. Der benötigte Strom wird on-board in einer Brennstoffzelle erzeugt. Dabei wird Wasserstoff und Sauerstoff chemisch, bei Temperaturen < 70 °C, zu Wasser umgewandelt. Bei dieser Reaktion wird weder CO₂ noch Stickoxid- oder Partikelemissionen freigesetzt, es handelt sich um lokal emissionsfreie Fahrzeuge. Ein weiterer Vorteil dieser Antriebsart liegt in der hohen Verfügbarkeit, die diese Technologie ermöglicht. Fahrzeuge mit Wasserstoff als Kraftstoff zeichnen sich nämlich durch hohe Reichweiten und schnelle Betankungsvorgänge aus.

3.1.1 Prinzip einer Brennstoffzelle

Die Funktionsweise von Brennstoffzellen lässt sich mit der von Batterien vergleichen: durch eine elektrochemische Reaktion zwischen Anode und Kathode entsteht Energie in Form von Strom und Wärme. Chemische Reaktionspartner in der Brennstoffzelle sind Wasserstoff und Sauerstoff, wobei die Sauerstoffzufuhr üblicherweise mittels Luftzufuhr realisiert wird. Es gibt mehrere Brennstoffzellen-Technologien, die jeweils ihre bevorzugten Anwendungsfälle haben. Für Mobilitätsanwendungen eignet sich die PEM (Proton-Exchange Membran) Brennstoffzelle besonders gut. Diese Technologie zeichnet sich durch hohe Flexibilität aus und die elektrochemische Reaktion erfolgt bei einer niedrigeren Temperatur (~70°C), die eine einfachere thermische Integration ermöglicht.

3.1.2 Wasserstoff als Kraftstoff

Wasserstoff besitzt eine hohe massebezogene Energiedichte: ein Kilogramm Wasserstoff enthält fast so viel Energie wie drei Kilogramm Benzin oder Diesel. Aber die volumenbezogene Energiedichte beträgt nicht einmal ein Drittel derjenigen von Benzin oder Diesel. Um den Vorteil der höheren massebezogenen Energiedichte nutzen zu können, muss der Wasserstoff verdichtet (oder auch verflüssigt) werden. Derzeit sind Druckstandards gängig mit 700 bar für PKWs und 350 bar für größere Fahrzeuge, wie etwa LKWs, Busse, Züge, etc.

Energieträger	Energiedichte (massebezogen) [kWh/kg]
Wasserstoff	33.33
Methan	13.9
Propan	12.88
Diesel	11.9
Benzin	12.0

Tabelle 1 Energiedichten von gängigen Energieträgern

Wasserstoff ist keine Energiequelle, sondern ein Energieträger. Somit ist Wasserstoff nur so CO₂-frei wie die für die Erzeugung eingesetzten Rohstoffe und Energie. Die am weitesten entwickelten Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff sind das Reformierungsverfahren und die Wasser-Elektrolyse.

Reformierung

In den unterschiedlichen Reformierungsverfahren wird den aus Kohlen-Wasserstoffen- Ketten bestehenden Energieträgern in mehreren Schritten der Wasserstoff entzogen. Die chemischen Reaktionen, die bei der Reformierung eines Kohlenwasserstoffs ablaufen, lassen sich wie folgt schreiben:



Als Nebenprodukt entsteht Kohlendioxid, das als CO₂ Emission anfällt, wenn der eingesetzte Kohlenwasserstoff fossiler Herkunft ist. Für Erdgas-Reformierung führt die Erzeugung von einem Kilogramm Wasserstoff (bedingt durch die chemische Reaktion) zur Emission von 10 kg CO₂.



Abbildung 14: Reformierungsanlage

Quelle: Linde

Elektrolyse

Bei der Wasserelektrolyse wird das Wasser mithilfe von elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff geteilt. Dabei handelt es sich eigentlich um das umgekehrte Verfahren, das in der Brennstoffzelle stattfindet.



Je nach Herkunft des eingesetzten Stroms werden dem Verfahren CO₂-Emissionen angerechnet. Unter der Annahme eines spezifischen Verbrauchs von 55 kWh Strom für die Erzeugung von einem Kilogramm Wasserstoff ergeben sich folgende Werte (CO₂-Belastung des Wasserstoffs durch den eingesetzten Strom):

Strom-Mix	CO ₂ -Belastung in kg CO ₂ / kg H ₂ durch Stromnutzung
DE 2018 [474 g/kWh]	26
100% Regenerativ [~0 kg/kWh]	~ 0

Tabelle 2 Elektrolyse: CO₂ Belastung des H₂ durch den eingesetzten Strom



Abbildung 15 PEM Elektrolyse Energiepark Mainz

Für eine klimaschonende Verbreitung der Wasserstofftechnologien spielt also die H₂- Infrastruktur eine entscheidende Rolle: auch wenn mit Brennstoffzellenfahrzeugen lokal keine Emissionen anfallen, gilt es, die gesamte Produktions- und Versorgungskette zu betrachten.

3.1.3 BZ-Busse: Stand der Technik

Busse mit Brennstoffzellenantrieb existieren in zwei Varianten. Bei der ersten handelt es sich um reine Brennstoffzellenfahrzeuge (BZ). Bei der zweiten handelt es sich um batterieelektrische Fahrzeuge, bei denen zusätzlich eine Brennstoffzelle als Range- Extender zur Verlängerung der Reichweite dient (BZ-REX). Beide Varianten verfügen über eine Brennstoffzelle, eine Batterie und einen Wasserstofftank.

BZ Bus

Der reine Brennstoffzellenbus ist mit einer relativ kleinen Batterie ausgestattet (üblicherweise < 30 kWh), die den Strom aus der Brennstoffzelle zwischenspeichert und bei Bedarf zusätzlich zur Brennstoffzelle Leistung für den Antrieb bereitstellt. Bei diesem Fahrzeugtyp ist der Wasserstoff die Hauptenergiequelle, der über eine leistungsstarke Brennstoffzelle umgewandelt wird. Die Batterie dient als Puffer, um die Lastgradienten bei der Brennstoffzelle zu mindern.

BZ-REX Bus

BZ-REX-Fahrzeuge sind üblicherweise mit einer deutlich größeren Batterie ausgestattet (> 200 kWh, in der Größenordnung von klassischen Batteriebussen) und einer zusätzlichen klein dimensionierten Brennstoffzelle. In dieser Konfiguration dient die Batterie als primäre Energiequelle, während die Brennstoffzelle für eine kontinuierliche Nachladung der Batterie sorgt.

Brennstoffzellen-Fahrzeug	H2-Range Extender Batterie-fahrzeug
Batterie: ~30 kWh	Batterie: ~250 kWh
Leistung Brennstoffzelle: ~100 kW	Leistung Brennstoffzelle: ~100 kW
H2 Tank: ~40 kg	H2 Tank: ~15 kg

Tabelle 3BZ und H2 REX Busse: Typische Kenndaten

Quelle: NOW, Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV

Aufgrund dieser Unterschiede in der Funktionsweise sind unterschiedliche Infrastrukturkomponenten notwendig: BZ-Fahrzeuge werden ausschließlich mit Wasserstoff betankt. Dagegen benötigen BZ-REX-Fahrzeuge neben der Wasserstoffinfrastruktur auch zusätzlich eine Ladeinfrastruktur, um die Batterie wieder aufzuladen. In der vorliegenden Studie werden nur reine BZ-Busse betrachtet.

3.1.4 BZ-Busse: Hersteller und Produktmerkmale

Über die letzten zwei Jahrzehnte sind in Europa zahlreiche Bus-Hersteller an H₂-Mobilitätsprojekte beteiligt worden und haben somit Erfahrung gesammelt. Die folgende Liste bietet einen Überblick an.

Hersteller	Modell	Land
Mercedes-Benz	Citaro FuelCell Hybrid	Deutschland
EbeEuropa	Blue city bus	Deutschland
PVI	Oréos 4X Hydrogen	Frankreich
SAFRA	Businova Standard / midibus	Frankreich
Solaris	Urbino 12 hydrogen / Urbino II 18,75	Polen
Solbus	SM12 H2FC	Polen
Ursus	City Smile CS12F	Polen
Caetanobus	H2.City Gold / Sora	Portugal
Van Hool	A330/Exquicity	Belgien
Rampini	Alè Hydrogen	Italien
Wrightbus	StreetDeck	Nord Irland

Tabelle 4 Überblick H₂-Bus Hersteller in Europa

Zwecks Veranschaulichung der allgemeinen Fahrzeugeigenschaften sind im folgenden zwei Busse als Beispiele näher detailliert.

Technische Daten	CITARO O 530 BZ (Mercedes Benz)	A330 (Van Hool)
Kraftstoff	Wasserstoff	Wasserstoff
Außenmaße	11.95x2.55x3.68 m	12x2.55x3.42 m
Tank-Kapazität	35-45 kg	38.7 kg
Reichweite	bis 350 km	bis 350 km
Verbrauch	11-13 kg /100 km	11-14 kg/ 100 km
Batterie	27 kWh	24 kWh/36 kWh
Brennstoffzelle(n)	2x60 kW (Ballard HD60)	2x 85 kW (Ballard HD85)
Antriebsmotor	225 kW	150 kW/210 kW
Betankungszeit	<20 Minuten	<10 Min
Sitzplätze/Fahrgäste	26/100	34/104

Tabelle 5 Technische Merkmale Citaro O530 BZ / A330



Abbildung 16 Bus O530 BZ

Wie sich erkennen lässt verfügen Wasserstoff-Busse über relativ hohe Reichweiten (entspricht in der Regel der durchschnittlichen Tagesfahrleistung der im ÖPNV eingesetzten Fahrzeuge) und kurze Betankungszeiten. Beide Punkte ermöglichen den Wasserstoff-Bussen, sie ähnlich wie Diesel-Busse zu betreiben.

3.1.5 Europäischen Erfahrungen im Rahmen öffentlicher Projekte

Seit 2012 sind EU-weit Demonstrationsprojekte gestartet, die den Einsatz von H₂-Bussen im ÖPNV und deren Datenanalyse während realen Bedingungen ermöglicht.

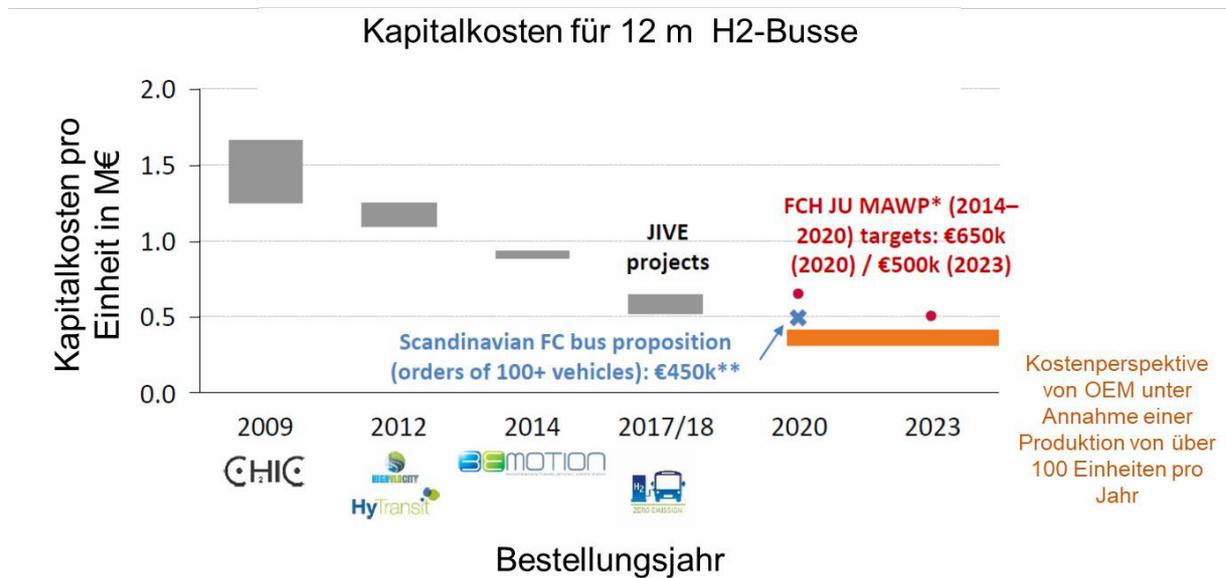
	 HyTransit	 Highvlocity	 3Emotion	 Jive	 Mehrlin	 Jive2
Projektstart	2013	2012	2015	2017	2017	2018
Projektende	2018	2019	2022	2022	2020	2023
Anzahl Busfahrzeuge	6	14	21 (+8)	139	Nur Tankstelle	152

Tabelle 6 FCHJU Demo-Projekte für H₂-Busse

Bei manchen der Projekte sind noch nicht alle vorgesehenen Fahrzeuge im Verkehr gebracht worden, dennoch sind bei der Hochrechnung im September 2019 bereits mehr als 10 Millionen zurückgelegte Kilometer angekündigt worden (<https://www.fuelcellbuses.eu/>).

3.1.6 Kostensenkung der Technologie

Ein kritischer Punkt für einen relevanten volkswirtschaftlichen Einsatz der Wasserstofftechnologien im ÖPNV stellt der Kostenfaktor dar. Neben den Kraftstoffkosten, die in einem späteren Teil dieser Studie näher untersucht werden, sind die Beschaffungskosten von signifikanter Bedeutung. Die folgende Grafik stellt die Entwicklung der im Rahmen der vorher erwähnten europäischen Projekte festgestellten Fahrzeugkosten dar.



* FCH JU MAWP is the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking's Multi-Annual Work Plan, the document that sets out the work plan and strategic targets for the second phase of the FCH JU's programme of research and innovation.

Abbildung 17 H2 Busfahrzeuge: Kostendegression

Element Energy, "European Hydrogen Bus Activity", October 2018)

Ein deutlich absteigender Trend lässt sich aus der Grafik erkennen, der im Zusammenhang mit der Entwicklung der Technologie aber auch mit der Anzahl der bestellten Fahrzeuge steht. Für die zukünftigen (möglicherweise gruppierten) Bestellungen lässt es sich möglicherweise mit einem Preis von ca. 400-450 k€ rechnen, unter der Voraussetzung eines koordinierten Großauftrags. Maßgebend für die Kostensenkung ist eine Transition zur Serienreifefertigung der H₂-Fahrzeuge.

3.1.7 Regulatorischer Rahmen für Bushersteller

Abgasnorm Euro 6

Seit Januar 2014 müssen alle in Europa neu zugelassenen Busse die Abgasnorm Euro 6 erfüllen. Die Veränderung der Schadstoffbelastung bei der Euro 6 Norm ist so groß wie alle vorherigen fünf Stufen zusammen: Die zulässigen Emissionswerte von Stickoxiden sind im Vergleich zu Euro 5 Norm, um 80 Prozent gesunken. Außerdem dürfen Nutzfahrzeuge nur noch 66 Prozent weniger Rußpartikel ausstoßen als bei der vorherigen Abgasnorm.

Anders als bislang beim PKW wird die Einhaltung der Grenzwerte für Diesel-busse im realen Fahrbetrieb kontinuierlich kontrolliert: Euro VIc mit verschärften OBD-Grenzwerten (On- Board-Diagnose). Über einen Zeitraum von bis zu 7 Jahren nach Inbetriebnahme und einer Laufleistung von bis zu 300.000 km (3,5 t-16 t zul. GG) bzw. 700.000 km (> 16 t zul. GG) müssen die Grenzwerte auf der Straße eingehalten werden. Dazu werden AdBlue- Tankinhalt, -Qualität, -Verbrauch sowie die NOx-Werte im Fahrbetrieb mit verschiedenen Sensoren überwacht. Weichen die kontinuierlichen Messungen der Abgasemissionen von

den geforderten Soll-Werten ab, sind drei Warnstufen vorgesehen, die einen Weiterbetrieb von Fahrzeugen mit defekter Abgasreinigung unmöglich machen.

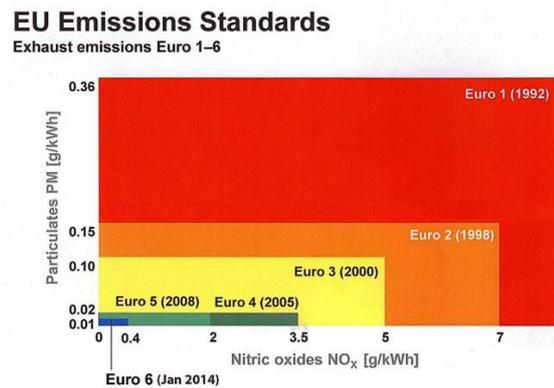


Abbildung 18 Eurnormen für Busse - Entwicklung der Anforderungen

Quelle: dougjack.co.uk

Wasserstoffbusse sind komplett lokal emissionsfrei und erfüllen somit die Euro 6 Norm. Batterie-Busse sind auch als emissionsfreie Fahrzeuge zu betrachten. Bei Letzteren bestehen dennoch Vorbehalte für den Begriff „lokal-emissionsfrei“, besonders den Winterbetrieb betreffend: Elektrobusse können mit zusätzlichen externen diesel- oder ethanol-basierten Heizgeräten ausgestattet werden, um eine Reichweite von etwa 200 Kilometern mit einer Batterieladung trotz niedrigeren Temperaturen zu erhalten. Diese Heizungen verursachen Abgase – und sind nicht den Vorschriften unterworfen, wie sie für Antriebsmotoren gelten. Nutzt man dagegen die Energie aus dem Akku, reduziert sich die Reichweite bei niedrigeren Außentemperaturen.

Abgasnorm Euro 7

Neue Grenzwerte sind in Vorbereitung und eine Euro 7 Norm könnte nach 2021 anstehen. Bei den Stickoxiden wird wieder eine deutliche Absenkung des Limits erwartet. Ob sich die zukünftigen Anforderungen mit Dieselmotoren weiterhin kostengünstig- im Vergleich zu emissionsfreien Technologien, einhalten lassen, bleibt offen.

3.1.8 Regulatorischer Rahmen für Busflottenbetreiber und Auftragsgeber: CVD

Die Europäische Union hat 2019 die „Clean Vehicle Directive“ (Directive (EU) 2019/1161 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 amending Directive 2009/33/EC on the promotion of clean and energy-efficient road transport vehicles) verabschiedet, die am 2. August in Kraft getreten ist. Mit dieser Richtlinie, die sowohl Auftraggeber nach der Richtlinie 2014/24/EU („öffentliche Auftraggeber“) als auch

Auftraggeber nach der Richtlinie 2014/25/EU („Sektorenauftraggeber“) adressiert, werden verbindliche Quoten für die Beschaffung von sauberen (also emissionsarmen und emissionsfreien) Nutz- und Lastfahrzeugen, im Rahmen öffentlicher Auftragsvergaben in zwei Schritten bis 2025 und bis 2030, eingeführt. Das betrifft insbesondere den öffentlichen Verkehr, Personensonderbeförderung, Bedarfspersonenbeförderung, Abholung von Siedlungsabfällen, Postbeförderung auf der Straße, Paketbeförderung, Postzustellung und Paketzustellung.

Die Hälfte des Mindestziels für den Anteil sauberer Busse muss durch die Beschaffung emissionsfreier Busse im Sinne von Art. 4 Nr. 5 der Richtlinie 2019/1161/EU erfüllt werden. Das sind saubere Fahrzeuge mit oder ohne Verbrennungsmotor, der weniger als 1 g CO₂/kWh ausstößt. Unter dieser Definition fallen unter anderen Batterie- und Wasserstoff- Busse.

Als für die Quoten relevanter Zeitpunkt der öffentlichen Beschaffung gilt das Datum, an dem die Auftragsvergabe abgeschlossen wird. Die Quoten betreffen deutschlandweit den Mindestanteil der sauberen Fahrzeuge an der Gesamtzahl der Fahrzeuge in den betroffenen Verträgen, pro Referenzzeitraum (2025 bzw.2030).

Für Busse sind verbindliche Ziele in Deutschland wie folgt definiert:

	Ab dem 2. August 2021 bis zum 31. Dezember 2025	Ab dem 1. Januar 2026 bis zum 31. Dezember 2030
Emissionsfreie Busse	22.5 %	32.5 %
Emissionsarme Busse	22.5 %	32.5 %

Tabelle 7 Verbindliche Quoten nach CVD

Diese Ziele gelten für den durchschnittlichen Anteil von emissionsarmen oder -freien Bussen an der Gesamtzahl der ausgeschriebenen Busse in ganz Deutschland. Theoretisch könnten manche Unternehmen am Dieselantrieb festhalten, wenn dafür andere Nahverkehrsunternehmen in Deutschland eine höhere Quote emissionsfreier Busse anschaffen. Auch damit könnte sich die CVD-Vorgabe erfüllen lassen, obwohl die Durchführung der notwendigen Kontrollen dadurch erschwert wird. Die Richtlinie ist bis zum 2. August 2021 in nationales Recht umzusetzen.

Eine weitere Unbekannte stellt die Artikulierung dieser Richtlinie mit dem deutschen Vergaberecht für die ÖPNV-Dienstleistungen hinsichtlich der bereits mit den Busverkehrsunternehmen abgeschlossenen Verträge. Da die Erfüllung dieser Vorgabe möglicherweise mit Mehrkosten verbunden ist, die bei der Einreichung der Angebote nicht bekannt waren, bleibt die Frage offen, wie diese Mehrkosten übernommen werden.

3.2 Kostenberechnung für eine Wasserstoff-basierte Busflotte in Offenburg

Das Stadtbus-Liniennetz dient als Ausgangspunkt für die in den folgenden Abschnitten entwickelten Szenarien bezüglich der Umstellung des bestehenden ÖPNV-Systems auf emissionsfreie Mobilität. Darauf aufbauend wird die progressive Umstellung des regionalen Busnetzes mit in Betracht gezogen. Neben den im API erläuterten Betrachtungen führen die folgenden Punkte zu diesem vorgeschlagenen Ansatz.



Abbildung 19
Innerstädtische
Busverkehr

Ein zentraler Knotenpunkt des Stadtbus-Netzes ist der Abschnitt der Hauptstraße, der zwischen den Haltestellen Bahnhof/ZOB und Rathaus/Zentrum liegt. Der Abschnitt wird von zehn bis zwölf Stadtbuslinien befahren. Somit wird die Fußgängerzone der Stadt Offenburg, die für die Hauptstraße nach der Haltestelle Stadtkirche beginnt und nach der Haltestelle Rathaus/Zentrum endet, von zehn Stadtbuslinien befahren. Die hohe Aktivitätsdichte auf dieser Strecke zieht eine hohe Aussetzung der Bevölkerung an Emissionen mit sich.

Außerdem würde die Umstellung dieser Buslinien auf eine emissionsfreie Mobilität, die unmittelbar mit sich eine niedrigere Lärmbelastung bringen würde, einen unmittelbaren und spürbaren

Beitrag zur Verbesserung des innerstädtischen Erlebnisses leisten.

3.2.1 Jährliche Fahrleistung der betrachteten Buslinien

Als Datengrundlage dienen die Fahrpläne der verschiedenen Buslinien, sowie die geographischen Daten des Liniennetzes. Aus diesen zwei Datensätzen lassen sich die Fahrleistungen für jede Stadtbuslinie ermitteln.

3.2.2 Dimensionierung der H₂-Busflotte für Stadtbuslinien

Auch wenn die Reichweite von Wasserstoffbusse nicht 1:1 der von Dieselnissen entspricht, ist sie allgemein größer als die von Batterie-Bussen. Während Dieselnisse eine Reichweite von ca. 500 km aufweisen, beschränkt sich die Reichweite von Wasserstoffbusse, bis jetzt, auf ca. 350 bis 400 km. Um den möglichen Einfluss dieser geringeren Reichweite über die Dimensionierung der Busflotte abzuschätzen hat EIFER ein simples Modell entwickelt. Das Modell, anhand der Software Anylogic© entwickelte, berücksichtigt die vorhandenen Fahrpläne, die zurückzulegende Streckenlänge, sowie technischen Parameter der H₂-Busse (spezifischer Verbrauch, Nutzkapazität des H₂-Tanks, Unverfügbarkeit wegen Betankungen). Es ermöglicht somit die Ermittlung der benötigten Mindestanzahl an Busse für jede Linie mit der entsprechenden Umlauflänge, sowie die temporale Nachfrage an Wasserstoff, die aussagt, wie oft und wann für eine bestimmte Linie eingesetzten Busse H₂ tanken müssen.

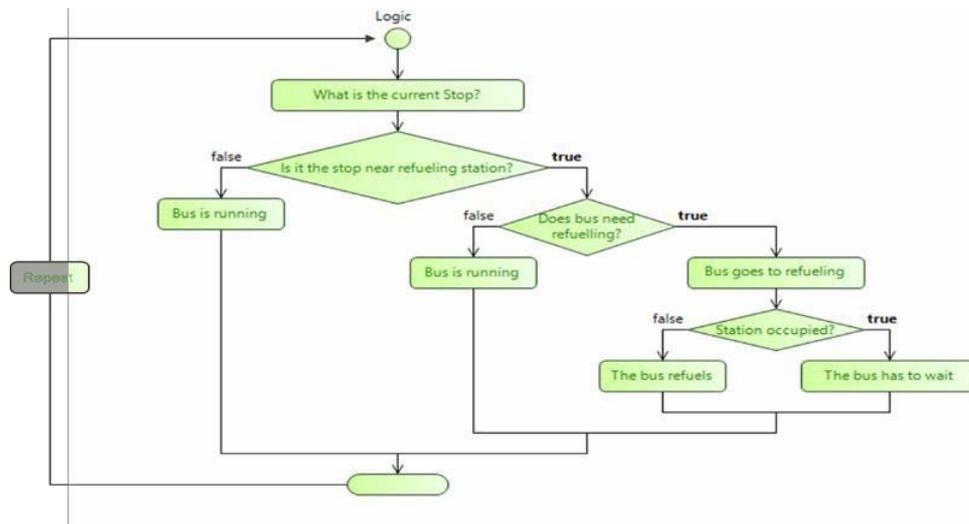


Abbildung 20 Entscheidungslogik des Modells

Die daraus resultierenden Ergebnisse sind für die Stadtbuslinien sowie für 2 ausgewählte Regionalbuslinien in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Linie	S1/S2	S3	S4	S5/S7	S6	S8	S9	R301	R106
Jährliche Fahrleistung [km p.a.]	256500	161000	148000	95000	205500	184000	43500	386500	367500
Anzahl Fahrzeuge	4	2	2	2	3	2	1	4	5
Fahrleistung pro Fahrzeug am Tag [km]	246	308	283	181	262	327	166	322	245
H2 Verbrauch im Jahr [T p.a.]	25,7	16,1	14,8	9,5	20,6	18,4	4,4	38,7	36,8

Tabelle 8 Kennzahlen Stadtbuslinien, R301 und R106

Aus den Simulationen ergibt sich, dass die für die betrachteten Linien eingesetzte Fahrzeuge sich 1:1 durch H₂-Busse ersetzen lassen können. Es sind somit 16 Busse im Stadtbusverkehr eingesetzt und 9 Busse für die zwei betrachteten Regionalbuslinien.

3.2.3 Fahrzeugkosten: Anschaffung und Wartung

Die Daten beruhen auf aktuelle Metastudien, die europaweit geführt worden sind. Datengrundlage stellen die Publikationen vom FCH JU (Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking) dar (bezogen auf den bereits erwähnten Demonstrationsprojekten) (siehe 1.6).

Seit 2009 haben sich die Kosten für die Anschaffung eines H₂- Busses um mehr als 60% reduziert und lagen bereits 2018 unterhalb der FCHJU Ziele für 2020. Fahrzeughersteller sehen vor, dass diese Kosten sich in einer nahen Zukunft der 400 k€ Schwelle annähern. Dafür sind steigende Volumen angenommen, die eine Optimierung der Fertigungsprozesse sowohl beim Bau der Busse als auch bei der Herstellung der Schlüsselkomponenten selbst (Brennstoffzelle, H₂-Tank etc.), ermöglichen. EMCEL hat 2018 ebenfalls diese Informationen in der folgenden Graphik kompiliert und hat sie durch Herstellerbefragungen um Prognosen für die Periode 2020-2030 ergänzt.

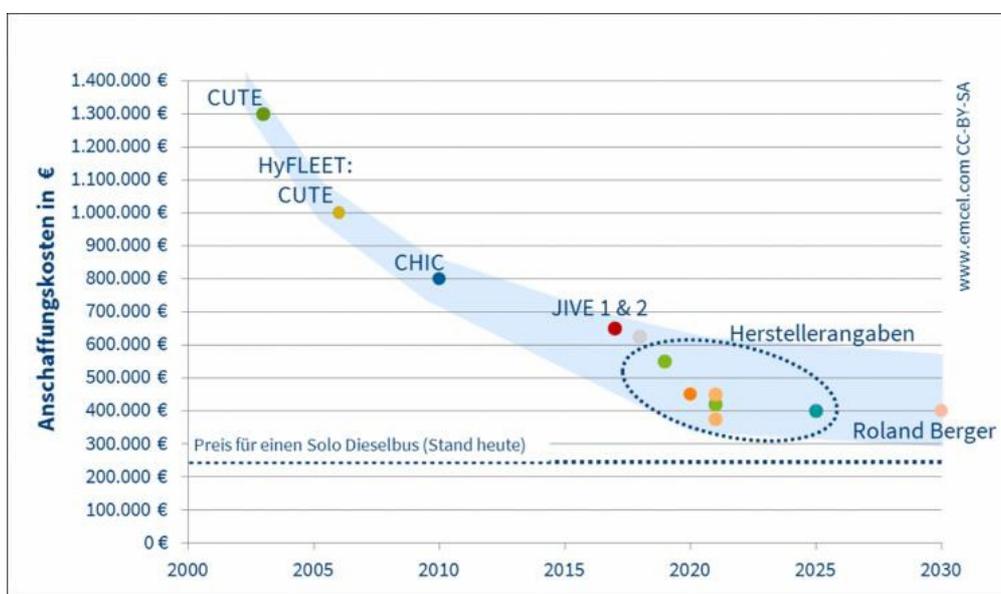


Abbildung 21 Kostenprognose für 12m H₂ Busse

Quelle: EMCEL

Diese Informationen bekräftigen 400 k€ als perspektivischen Richtwert für die Anschaffungskosten eines H₂-Busses ab 2020. Darüber hinaus scheint eine Unterschreitung des Wertes nicht ausgeschlossen, auch wenn Roland Berger, bis 2030, weiterhin 400 k€ als Richtwert vorsieht. Die FCHJU Studie NewBusFuel schlägt 430 k€ als Richtwert ab 2023 vor. Diese Zahl wird als Referenzwert für das zentrale Szenario der hier vorgestellten Berechnungen genommen. Das Korpus der grundlegenden Hypothesen (Anschaffungs- und Wartungskosten) für die TCO Berechnung ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Wert	Hypothesen
Bus-Anschaffungskosten	Optimistisch: 360 k€ Basic: 430 k€ (Quelle: NBF Studie) Konservativ: 500 k€
Lebensdauer Bus	12 Jahre (Fahrzeug) (Quelle: NBF Studie)
Spezifischer Verbrauch BZ	10 kg/100km
Lebensdauer BZ	6 Jahre (Quelle: NBF Studie)
Kosten BZ	50 k€ (Quelle: NBF Studie)
Bus Wartung	30 k€ p.a. (Quelle: NBF Studie) Optimistisch: 6€/kg
H ₂ Kosten	Basic: 8 €/kg Konservativ: 10 €/kg

Tabelle 9 Hypothesen für die TCO Berechnung

Die jeweils angenommenen Werte für die Anschaffungskosten und die Wasserstoffbezugskosten, ermöglichen es, eine Sensibilitätsanalyse durchzuführen, um die entscheidenden Einflussfaktoren über die Kostenstruktur eines H₂-Busbetriebs zu erläutern. Die angenommenen Wasserstoffkosten berücksichtigen die Kosten für die benötigte Infrastruktur und verstehen sich als frei von der Zapfsäule. In dem zweiten Teil dieses Berichts wird die entscheidende Frage der Wasserstoffversorgungsstrategie detailliert adressiert. 8 €/kg dient als Richtwert für den Wasserstoffpreis (ohne MWSt) an den öffentlichen H₂-Tankstellen der H₂ Mobility Deutschland GmbH (9,5 €/ kg inkl. MWSt).

3.2.4 Gesamtkosten Berechnung (TCO)

Da die Größe der Busflotte mit H₂ Antrieb im Vergleich zu einer Busflotte mit Dieselantrieb unverändert bleibt, wurden die Fahrerkosten nicht mit in der Kalkulation berücksichtigt. Folgende Tabelle erläutert die gebildeten Szenarien.

CAPEX/OPE X Kosten	CAPEX Optimistisch h 360 k€	CAPEX Basic 430 k€/Bus	CAPEX Konservativ 500 k€/Bus
OPEX Optimistisch	TCO1	TCO2	
OPEX Basic 8 €/ kg H ₂		TCO3	TCO4
OPEX Konservativ		TCO5	TCO6

Tabelle 10 Abgebildeten Kostenszenarien

Um ein Vergleich mit den aktuellen Kosten zu ermöglichen, wurden auch Kalkulationen für ein Diesel-Szenario durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Graphik zusammengefasst.

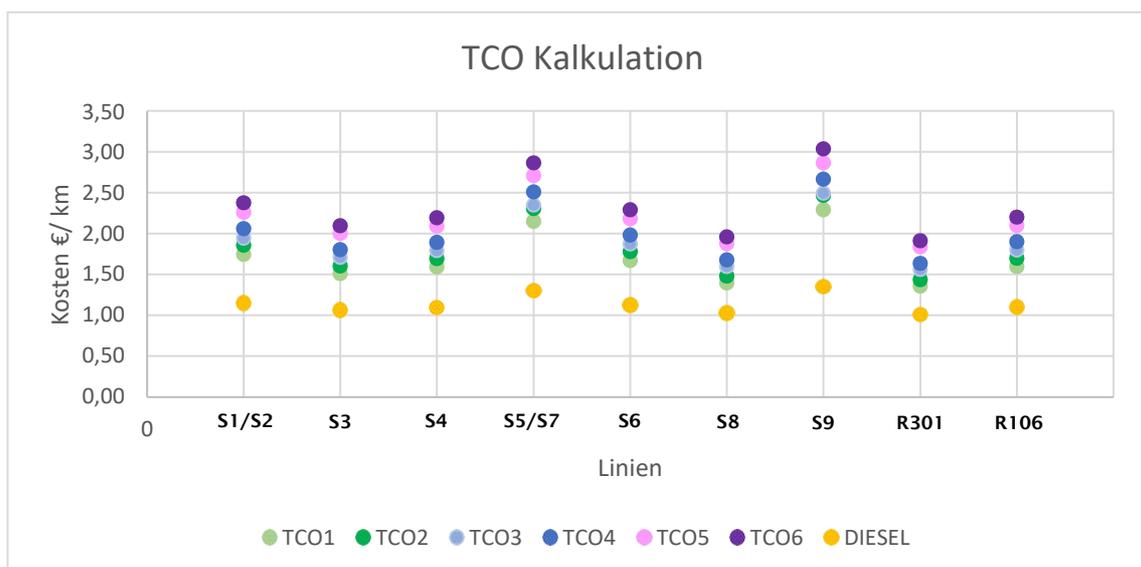


Abbildung 22 Vergleich der Gesamtkosten für verschiedenen Linien

Als Referenz-Szenario wurde das TCO3 angenommen (Fahrzeugkosten für 2020, H₂-Referenzpreis an den H₂-Mobility Deutschland Tankstellen), das auf konsolidierten Daten beruht. Der relative Kostenunterschied (Fahrerkosten ausgeschlossen) zwischen der Diesel-Variante und dem Szenario TCO3 wird für die verschiedenen Linien in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

	S1/S2	S3	S4	S5/S7	S6	S8	S9	R301	R106
TCO3	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
TCO2	96%	94%	94%	98%	95%	93%	99%	92%	95%
TCO1	90%	88%	89%	91%	89%	87%	92%	87%	89%
Diesel	59%	62%	61%	55%	60%	64%	54%	65%	61%

Tabelle 11 Kostenvergleich der verschiedenen Szenarien (relativ)

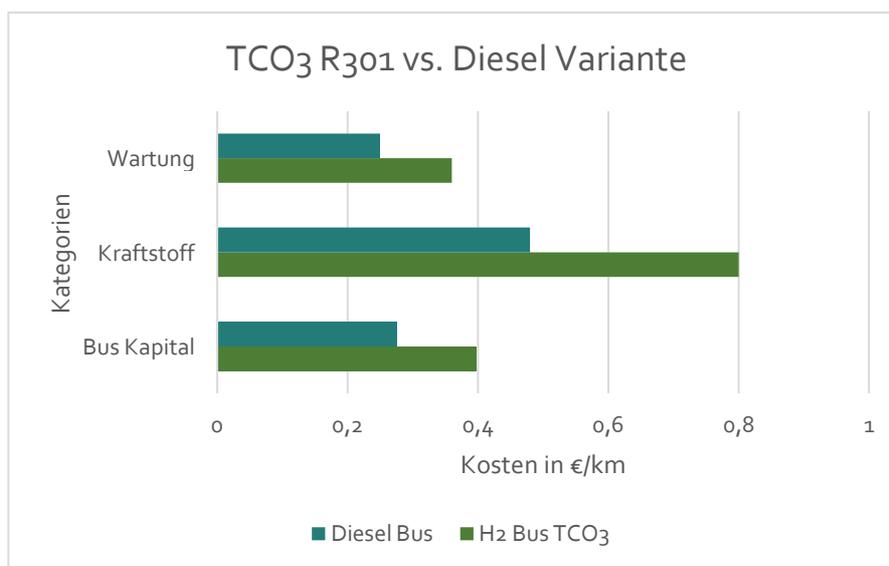


Abbildung 23 Vergleich Kosten TCO3 (8€/kg H₂) vs. Diesel:Linie R301

Einen signifikanten Beitrag zur Betriebskostensteigerung leisten die Kraftstoffkosten. Deshalb stellt die Aufstellung einer kostengünstigen Wasserstoffinfrastruktur eine besondere Herausforderung dar. Eine Kraftstoffkostenparität würde bei 5€/kg liegen. Berücksichtigt man die Personalkosten nicht, liegt im Durchschnitt die Diesel Variante 40 % unterhalb des H₂-Referenzszenarios TCO3. Da aber die Personalkosten einen hohen Anteil an den Gesamtkosten des Busbetriebs haben, kann diese relative Kostendifferenz, mit Fahrerkosten eingeschlossen, signifikant niedriger ausfallen. Ebenso reduziert sich der Kostenunterschied, wenn günstigere Kraftstoffkosten betrachtet werden, die unter bestimmten Annahmen im Fall einer Eigenerzeugung zu erzielen sein können. Linien mit der höchsten Fahrleistung pro eingesetztem Fahrzeug (S8, R301, vergleiche Tabelle 8) weisen einen kleineren Kostenunterschied zwischen Diesel und H₂- Variante auf, im Vergleich zu weniger ausgelasteten Linien. Daraus lässt sich ableiten, dass der Einsatz von H₂-Bussen auf Linien mit höherer Fahrleistung pro Fahrzeug, in der Regel regionale Linien, von der wirtschaftlichen Perspektive sinnvoll sind. Das entspricht auch den Linien, bei

denen die Umstellung der Busflotte auf Batterie-Busse technische und wirtschaftliche Hürden mit sich bringt (Reichweite im Fall von Overnight-charging, Vermehrung der Ladepunkte im Fall von Opportunity-Charging)

3.3 H₂-Versorgung

Neben der Anschaffungs- und Betriebskosten einer Busflotte stellt die Sicherstellung einer zuverlässigen und kostengünstigen Wasserstoffinfrastruktur eine besondere Herausforderung dar. Außerdem müssen die Skalierbarkeit sowie die Umweltverträglichkeit sichergestellt werden.

Wasserstofferzeugungsanlagen zeichnen sich durch hohe Investitionskosten aus. Deshalb besitzen Skaleneffekte einen signifikanten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit.

3.3.1 CO₂-Emissionen

Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb emittieren nicht bei ihrem Betrieb, dennoch kann die Erzeugung des benötigten Wasserstoffs, je nach eingesetzten Verfahren und Energiequelle, CO₂-Emissionen verursachen.

Erzeugung	CO ₂ -Emissionen pro kg H ₂
Elektrolyse mit deutschem Strom Mix 2018 [474 g/kWh]	~26 kg
Erdgas Dampfreformierung	~10 kg
Elektrolyse mit 100% regenerativem Strom [~0 kg/kWh]	~ 0 kg

Tabelle 12 CO₂ Bilanz bei der Wasserstofferzeugung

Darüber hinaus kann der eingesetzte Wasserstoff aus mehreren Quelle bezogen werden, die jeweils anteilig den CO₂-Inhalt des Wasserstoffs verschieden belasten. Die folgende Graphik stellt die resultierenden CO₂-Emissionen eines Busbetriebs dar, je nach CO₂- Footprint des eingesetzten Wasserstoffs dar.

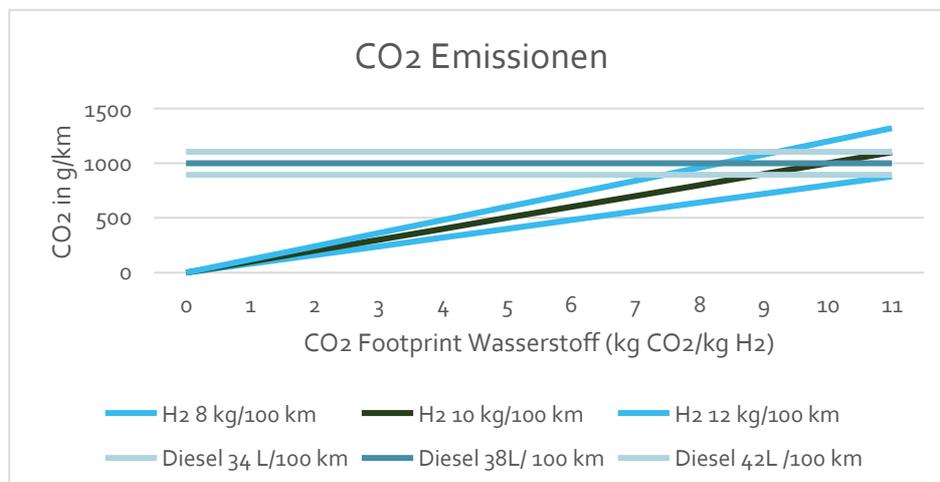


Abbildung 24 CO₂ Bilanz Busverkehr mit Wasserstoff

Die auf der Wasserstoffherzeugung angerechneten Emissionen müssen unter 10 kgCO₂ /kg H₂ bleiben, um eine bilanzielle Minderung der CO₂-Emissionen aus dem Busbetrieb zu erreichen. Dies wird durch eine Mischung aus „grünem“ und „grauem“ Wasserstoff erreicht (derzeitiger Ansatz der H₂ Mobility Deutschland GmbH) oder durch die reine „null- Emissionen“ Erzeugung von Wasserstoff, mittels Wasserelektrolyse und anhand regenerativem Strom.

3.3.2 Kostenproblematik bei der Wasserelektrolyse

Elektrolyseanlagen sind kapitalintensiv und ihre spezifischen Kosten (in €/kW installierte Leistung) hängen stark von ihrer Größe ab.

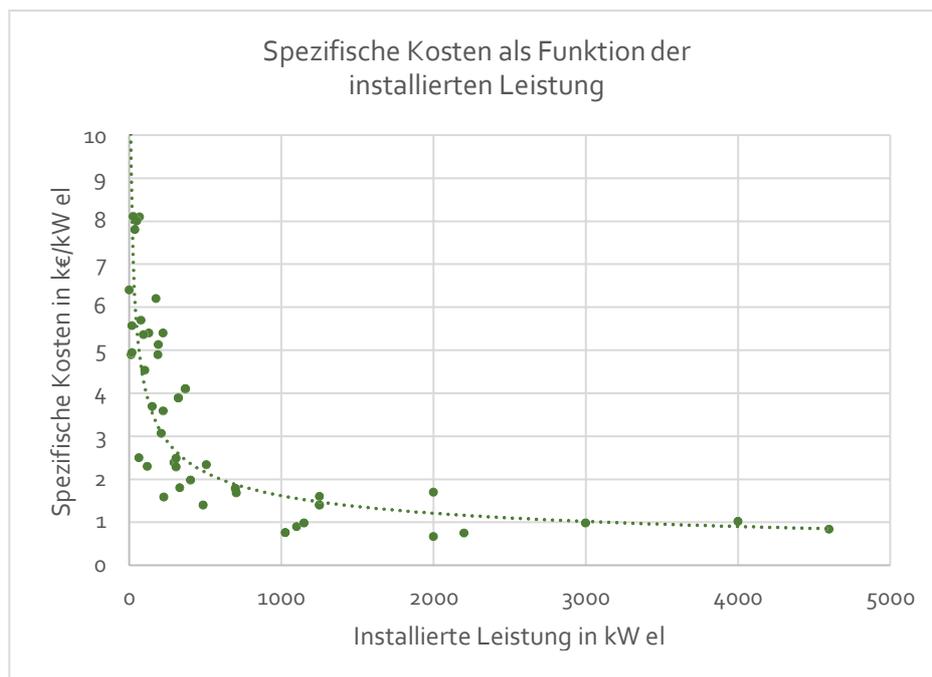


Abbildung 25 Spezifische Kosten einer Elektrolyseanlage (k€/kW)

Quelle: EIFER

Aus dieser Graphik lässt sich ableiten, dass Elektrolyseanlagen der MW-Größenordnung die kleinsten spezifischen Investitionskosten besitzen. Trotzdem erfordern diese eine hohe Zahl an Betriebsstunden, um eine wirtschaftliche Abschreibung zu ermöglichen. Die folgende Tabelle zeigt die resultierenden Abschreibungskosten in €/kg H₂ für eine 1 MW Elektrolyseanlage (Zinsen: 4%, Anschaffungskosten: 1M€ - 1k€/kW, Dauer der Abschreibung: 20 Jahre, Wirkungsgrad: 55kWh/kg). 1MW Elektrolyse entspricht einer Erzeugungskapazität von ca. 400 kg/Tag bei voller Last. Diese Kapazität entspricht dem Wasserstoffbedarf einer Busflotte von 15 Bussen.

Betriebsstunden p.a.	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
H ₂ Produktion in kg p.a.	18.182	36.364	54.545	72.727	90.909	109.091	127.273	145.455
Abschreibungskosten in €/kg H ₂	4,05 €	2,02 €	1,35 €	1,01 €	0,81 €	0,67 €	0,58 €	0,51 €

Tabelle 13 Abschreibungskosten Elektrolyseanlage

Über 4000 Volllaststunden pro Jahr erscheinen als eine klare und minimale Anforderung für den wettbewerbsfähigen Betrieb eines Elektrolyseurs. Zusätzlich zu diesen Kosten kommen Wartungskosten in Betracht, die üblicherweise 3% der jährlichen Anschaffungskosten betragen, sowie der Austausch von den Stacks nach einer bestimmten Dauer. Ein anderer wichtiger und entscheidender Kostenfaktor bei der elektrolytischen Wasserstofferzeugung stellt der Strompreis dar. Betrachtet man Wartungskosten in Höhe von 5% des Kapitals (einschließlich Stack-Austausch), lassen sich die Gestehungskosten von Wasserstoff als Funktion des Strompreises unter der Annahme von 6000 Volllaststunden pro Jahr wie folgt abbilden:

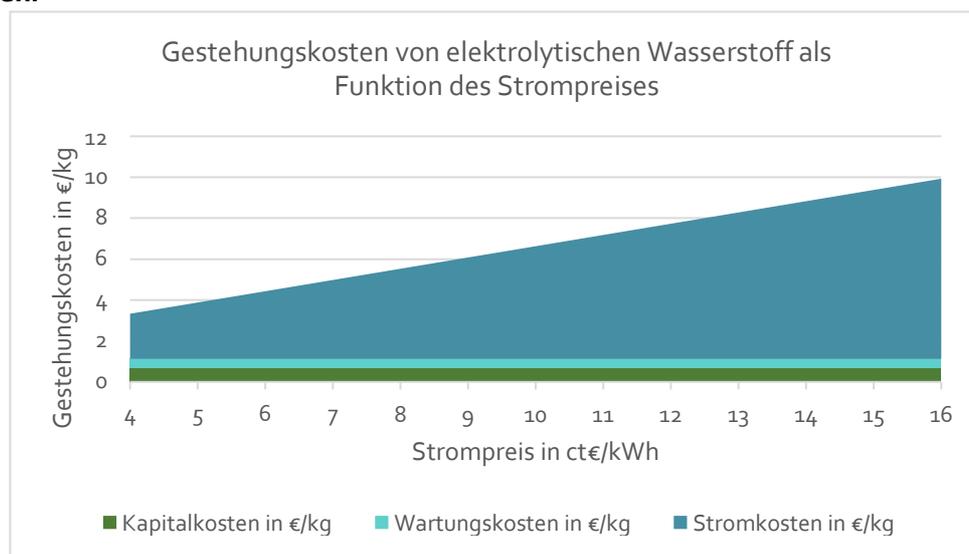


Abbildung 26 Gestehungskosten Wasserstoff als Funktion des Strompreises

Derzeit liegen nach BDEW 2019 die durchschnittlichen Stromkosten für Industriekunden bei 18,44 ct€/kWh. Elektrolyseanlagen sind von der Stromsteuer befreit, und würden, bei selbigen Annahmen, einen Strompreis von 16,9 ct€/kWh genießen. Dies würde aber trotzdem zu Gestehungskosten von über 10 €/kg Wasserstoff führen. Ein wichtiger Beitrag zum Strompreis leistet die EEG Umlage, die bei der jetzigen Gesetzgebung nur im Fall einer Eigenversorgung mit nicht EEG Anlagen für Elektrolyse entfallen würde. Diese Konfiguration ermöglicht ebenso auf Netzentgelte sowie Vertriebskosten zu verzichten und somit Gestehungskosten zwischen 4 und 6 €/kg zu erreichen.

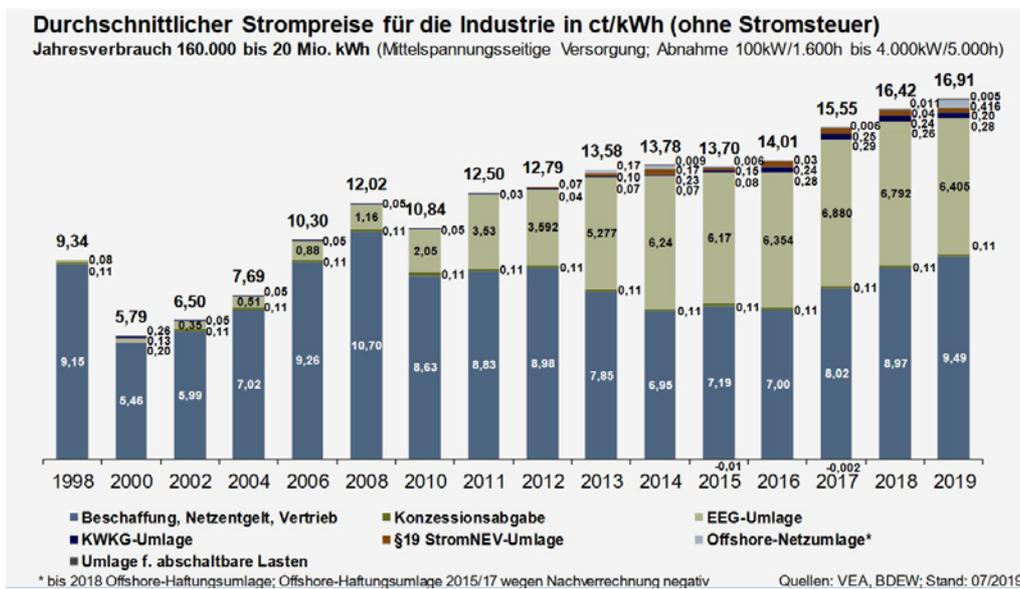


Abbildung 27 Strompreise für Industrie Stand 07/2019

3.3.3 H2 Mobility Deutschland

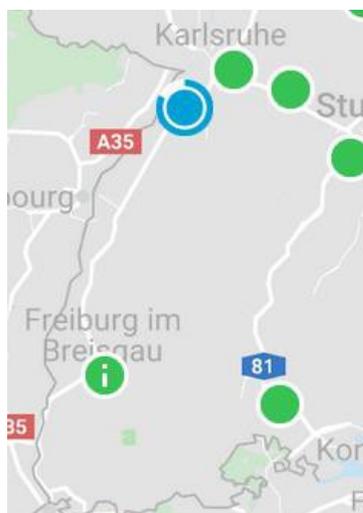


Abbildung 28 H2 Mobility Tankstellen

H2 Mobility Deutschland ist ein Joint Venture, das sich dem Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland widmet. Um Offenburg herum liegen die nächsten H2 Tankstellen in Freiburg im Breisgau und in Karlsruhe. Auch die in Rastatt gebaute Station wird die Lücke des A5 Korridors nicht vollständig schließen können. Eine in der Umgebung von Offenburg platzierte H2-Tankstelle könnte sowohl für den PKW Verkehr als auch für den Bus ÖPNV einen Beitrag leisten. Die H2 Mobility Deutschland bietet die Möglichkeit an, 700 bar Tankstellen mit einem 350 bar Modul zu erweitern, das die tägliche Versorgung von ca. 6 Busse ermöglicht. Auch wenn es nur begrenzt skalierbar ist, stellt diese Lösung eine Chance für den Aufbau einer Wasserstoff Infrastruktur im Kreis Offenburg dar. Mit begrenzten Risiken für die Verkehrsunternehmen bietet es sich an, die H2 Mobilität auf eine limitierten Busflotte zu erproben. Wasserstoffkosten werden pro kg angerechnet ohne weiterer Aufwand für die

Verkehrsunternehmen. Dieser Ansatz wurde von der SSB in Stuttgart verfolgt. Derzeit tanken die erprobten Busfahrzeuge an der Wasserstofftankstelle des Stuttgarter Flughafens. Nach dieser Erprobungsphase ist der Aufbau einer SSB eigenen Wasserstoffinfrastruktur in Diskussion. Für die SWEG, dessen Fuhrpark aus mehr als 400 Busse besteht, würde eine solche Erprobung mit 5-6 Fahrzeugen, einen limitierten finanziellen Aufwand bedeuten.

3.3.4 Wasserstoffquellen in der Region

Mit Blick auf eine mögliche Hochskalierung einer H₂-Busflotte sind bereits vorhandene Wasserstoffquellen in der Region in folgender Tabelle eingetragen.

Name	Potenzial	Entfernung
BASF Industriepark Ludwigshafen	Hohe verfügbare Mengen an Wasserstoff	142 km
Infraserv Industriepark Höchst	Hohe Mengen an Wasserstoff (30 M Nm ³ p.a.), bereits Busse, 27 Züge geplant. Restmenge zu klären	211 km
Energiepark Mainz	EE-Elektrolyse, Potential begrenzt (3,75 MW)	215 km
Wasserkraft Whylen am Rhein	EE-Elektrolyse, 1MW Aussichten auf grösseres Potenzial, 10MW Reallabor-	128 km

Tabelle 14 H₂ Quellen in der Region

Neben diesen bereits vorhandenen Wasserstoffquellen, ist das Produktionspotenzial der Wasserkraftwerke am Rhein zu berücksichtigen. Diese sind in der Regel nicht EEG-Anlagen, die somit eine kostengünstige, stabile und erneuerbare Produktion anbieten. Sie eignen sich gut für die Eigenversorgung von Elektrolyseanlagen. Ihre Nähe zu Offenburg stellt, neben den Gestehungskosten, günstigere Transportkosten (Gesamtkosten ca. 6 €/kg frei Bustankstelle) für eine flächendeckende Umstellung des Busverkehrs auf emissionsfreie Mobilität in Aussicht.

Wasserkraftwerk	Installierte Leistung (Turbinen)	Entfernung Offenburg
Straßburg	>100 MW (EDF)	22 km
Gamsheim	>100 MW (EDF/EnBW)	38 km
Iffezheim	>100 MW (EnBW/EDF)	59 km

Tabelle 15 Rhein Wasserkraftwerken - Entfernung und installierte Leistung

3.4 Zusammenfassung

Bei der Wasserstoffmobilität ist die Versorgungsinfrastruktur von entscheidender Bedeutung. Ihr Aufbau ist mit hohen Investitionskosten und gesetzlichen Verpflichtungen verbunden (BImSchG, BetrSichV), die für eine erste Erprobung der Technologie im kleinen Maßstab eine Hürde für Verkehrsunternehmen darstellen könnte. Aus diesem Grund wird für den ÖPNV Offenburg und Umgebung eine erste Erprobungsphase empfohlen, die im Rahmen einer mit der H₂-Mobility Deutschland abzuschließenden Kooperation den Betrieb von 4-6 H₂-Bussen im Kreis Ortenau ermöglichen soll. Während dieser Phase (3 Jahre zum Beispiel), die gegebenenfalls im Rahmen eines öffentlich geförderten Projekts stattfinden könnte, sollen in der Region Möglichkeiten für die emissionsfreie Erzeugung und Bereitstellung von Wasserstoff für den Ortenaukreis detailliert untersucht werden. Einige sind bereits erwähnt worden, andere können sich aus wünschenswerten Änderungen der Gesetzgebung ergeben, insbesondere im Bereich der Stromabgaben.

4 Analyse einer batterieelektrischen Umsetzung

Die Einführung von batterieelektrischen Bussen stellt für die Reduzierung von Emissionen, vor allem von CO₂, NO_x, Feinstaub und Lärm auch eine Alternative dar. In diesem Teil des Projektes wird das TCO-Modell (Total Cost of Ownership-Model – Gesamtkosten-Modell) erstellt, um den öffentlichen Verkehr in Offenburg und Umgebung auf die Umstellung auf Elektrobusse zu untersuchen.

Auf Basis einer ausführlichen Literaturrecherche werden die technisch-ökonomischen Daten einer rein elektrischen Umsetzung im öffentlichen Verkehr der Stadt Offenburg und des Umlandes analysiert und zusammengestellt. Bezüglich der Lernrate wird, mit Hilfe historischer Daten, eine Prognose der Marktpreise durchgeführt. Insbesondere im Bereich der Batterien ist eine hohe Dynamik zu erwarten - sowohl hinsichtlich möglicher Materialzusammensetzungen als auch hinsichtlich der Kosten.

Der Energieverbrauch für jede Route wird anhand der einzelnen Linien, des Bustyps, des Ladesystems und anderer Informationen ermittelt. In dieser Studie werden verschiedene Szenarien untersucht, um den Einfluss der einzelnen Faktoren zu bewerten.

4.1 Gesamtkostenrechnung

Zur Ermittlung der Gesamtkosten ist eine Analyse der Offenburger Buslinie erforderlich. Basierend auf den von API analysierten Buslinien wurde eine geeignete Buslinie ausgewählt, die durch einen elektrischen Bus ersetzt werden soll. Es wurde die für jeden Bus erforderliche Batteriekapazität basierend auf der Gesamtlänge der Linie und der pro Tag zurückgelegten Strecke ermittelt und der Gesamtbedarf berechnet. Der Datenpool für die Gesamtkostenrechnung wurde durch Literaturrecherchen erweitert. Es gibt viele verschiedene Faktoren, die sich auf die Gesamtkosten eines Busses auswirken. Wichtige Variablen sind die Kapitalkosten der Busse, die Kosten für die E-Bus-Batterie, deren Lebensdauer, die Betriebskosten, die Effizienz, die Strom- und Dieselpreise sowie die Infrastrukturkosten.

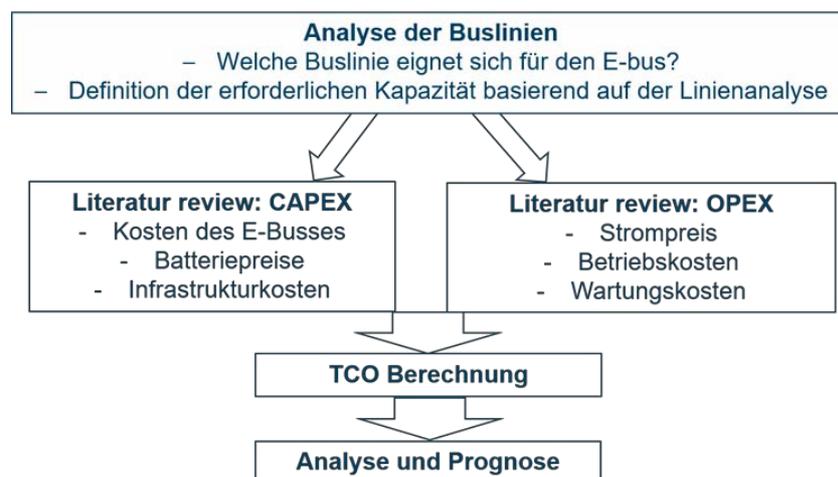


Abbildung 29 Flussdiagramm zum Aufbau des Gesamtkostenmodells

4.2 Literaturrecherche

Literaturrecherchen sind erforderlich, um ein zuverlässiges TCO-Modell zu erstellen. Das Ziel ist es, zugehörige Daten zu jedem CAPEX und OPEX zu erfassen. Diese Studie fokussiert den Preis, d.h. den Betrag, den der Kunde direkt bezahlt, und nicht auf die Kosten, die einem Unternehmen für ein Produkt entstehen. In vielen Literaturangaben werden hier die Werte nicht klar angegeben. Zum Beispiel gibt es einen großen Unterschied zwischen den Kosten und dem Preis im Batteriebereich. Durch die eindeutige Unterscheidung kann die Zuverlässigkeit des TCO-Modells erhöht werden. Zudem fokussierte die Literaturrecherche sich auf Daten der letzten fünf Jahre, da durch die hohe Dynamik im Markt ältere Literaturquellen ungenau werden. Zugehörige Preisdaten wurden aus insgesamt 88 Literaturen extrahiert. Im Folgenden wird ein Überblick über die Literaturrecherche gegeben. Eine Liste der Literaturquellen und deren Referenz findet sich im Anhang A-4.

4.2.1 CAPEX

Die Kostenkategorien für Investitionsausgaben (CAPEX) in der Busbranche des ÖPNV umfassen die Kosten für Buseinheiten, die Kosten für im Bus montierte Batterien und die Kosten für die Gebäudeinfrastruktur, einschließlich Ladestationen, Netzanschlusskosten, Planung, Installation und Baukosten. Das Leasing von Bussen, Batterien und Infrastruktur wurde hier nicht berücksichtigt.

4.2.1.1 Elektrobus

Öffentliche Busse, die in Deutschland eingesetzt werden, sind nach der Länge in 10,7 m, 12 m und 18 m unterteilt. Häufig genutzte Busse in Offenburg sind 12 Meter lang, worauf der Schwerpunkt in dieser Arbeit gelegt wird.

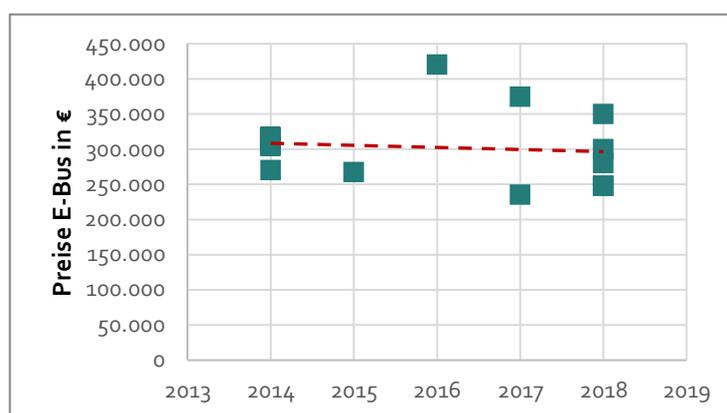


Abbildung 30 12 m E-Bus Kosten (Anhang A-4.2)

Die Buspreise in der obigen Grafik variieren zwischen 235.000- 420.000 €, enthalten allerdings keine Preise für Batterien. Der Durchschnittspreis beträgt 300.000 €, wobei sich der Preis im Vergleich zum Durchschnittspreis vor fünf Jahren und heute kaum verändert hat.

Der günstigste Bus ist das Modell BYD K9 der chinesischen Firma BYD, welcher 230.000 € kostet. Heute ist China der größte Hersteller von Elektrobussen¹. BYD ist zudem unter mehreren großen chinesischen Herstellern der weltweit größte Hersteller von rein elektrischen Bussen. Der Bus von Bozankaya / Sileo, einem türkischen Unternehmen, welcher in deutschen Städten wie Bonn und Bremen eingesetzt wird, kostet 280.000 €. Ein weiteres bekanntes Elektrobussenunternehmen, Solaris, ist in Städten wie Berlin, Braunschweig und Oberhausen tätig. Der Solaris 12 m Bus kostet 300.000 Euro. (Anhang A-4.2).



Abbildung 31 Bozankaya E-Bus² (links), Solaris E-Bus³ (rechts)

Der 18-Meter-Bus kostet zwischen 500.000 und 680.000 Euro und ist damit etwa doppelt so teuer wie der 12-Meter-Bus (Anhang A-4.2). Beispielsweise kostet ein Modell eines von Solaris hergestellten 18-Meter-Busses 532000 Euro, das 1,8-fache des vom selben Unternehmen hergestellten 12-Meter-Modells. Der Preis des Busses mit der Batterie wurde ebenfalls untersucht. Die Batterien wurden aufgrund des großen Einflusses auf den Buspreis separat ermittelt. (Anhang A-4.3). Der Preis für den E-Bus wird ebenfalls weitgehend nach der Lademethode unterteilt. Derzeit gibt es drei Hauptmethoden zum Laden eines Elektrobusses. Bei der günstigsten und der am weitesten verbreiteten Methode, das Aufladen über Nacht, wird der Bus nachts aufgeladen, wenn dieser nicht fährt. Dies wird als Depotladung oder Plug-in-Ladung bezeichnet.

Beim Laden über einen Pantographen wird ein auf dem Dach montiertes Gerät verwendet, mit dem eine Verbindung zu dem Pantographen hergestellt wird und dann eine Schnellladung erlaubt. Dies entspricht dem Konzept des Gelegenheitsladens, bei dem während der Laufzeit mehrmals täglich aufgeladen wird. Beim kabellosen Laden werden Spulen verwendet, die unter der Fahrhahnoberfläche installiert sind und die Energie an die, unter dem Busboden, entsprechenden Spulen übertragen können. Es gibt stationäres und dynamisches kabelloses Laden. Beim stationären Laden muss das Fahrzeug über den Fahrhahnsulen positioniert werden, um das Laden zu aktivieren. Beim dynamischen kabellosen Laden werden Fahrzeuge während der Fahrt geladen. Die Technologie befindet sich jedoch noch in der Pilot- und Demonstrationsphase und wird hier nicht weiter betrachtet.

¹ ZeEUS eBus Report, An overview of electric buses in Europe

² <https://de-de.facebook.com/pg/bozankayaofficial/posts/>

³ VDV, <https://www.vdv.de/e-bus-projekt.aspx>

Fahrzeugkomponenten	Wert	Einheit	Kommentar
Induktives Ladung E-Bus	375000	€	90 kWh Kapazität, Effektive Batteriekapazität: 60%
Basisbus	210000	€	
Antriebssystem & Leistungselektronik	105000	€	
Ladekomponenten busseitig	60000	€	
Gelegenheitsladebus	330000	€	90 kWh Kapazität, Effektive Batteriekapazität: 60%
Basisbus	210000	€	
Antriebssystem & Leistungselektronik	105000	€	
Ladekomponenten busseitig	15000	€	
Übernachtladung E-bus	320000	€	315 kWh Kapazität, Effektive Batteriekapazität: 85%
Basisbus	210000	€	
Antriebssystem & Leistungselektronik	105000	€	
Ladekomponenten busseitig	5000	€	

Tabelle 16 E-Bus-Ausfallkosten für drei verschiedene Lademethoden

Quelle: Alexander Kunith, 2017. Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs. Tabelle 4-6, pg. 142

Tabelle 16 zeigt die Differenz der Buspreise für die drei Buslademethoden. Die Grundkosten für Buseinheit, Antriebssystem und Leistungselektronik sind gleich, unterschiedlich sind jedoch der Preis für die Batterie und die busseitigen Ladekomponenten. Die Ladevorrichtung, welche im Bus installiert werden muss, hat mit 60.000 Euro den höchsten Preis, gefolgt vom Pantographen und schließlich dem Laden über Nacht. Der Preisunterschied der Batterie wird im nächsten Kapitel erläutert.

4.2.1.2 Kosten des Akkumulators

Die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien von Elektrofahrzeugen steigt dramatisch. Dementsprechend steigt auch die Produktionsindustrie für Akkumulatoren mit der Nachfrage, was Druck auf die Preise ausübt.

In dieser Arbeit wurden die Preise von Lithium-Ionen-Akkupacks anhand von Review- Artikeln und Einschätzungen der Marktpreise sowie Metastudien, in denen Zusammenstellungen verschiedener Quellen kombiniert werden, analysieren.

Die Preise eines Batteriepacks werden im Folgenden als die Marktpreise für die Bushersteller bewertet, die in der Regel aus den gekauften Batteriezellen der Zulieferer zu einem bestimmten Batteriezellenpreis und den zusätzlichen Kosten, inkl. Margen, für die Herstellung eines Batteriepacks bestehen. Viele Datenpunkte in der wissenschaftlichen Literatur zu Akkumulatoren beziehen sich daher auf eine Kostenschätzung, Schätzungen zu Marktpreise, bei denen der gesamte Akkumulator vom Endabnehmer gekauft wird sind eher unüblich.

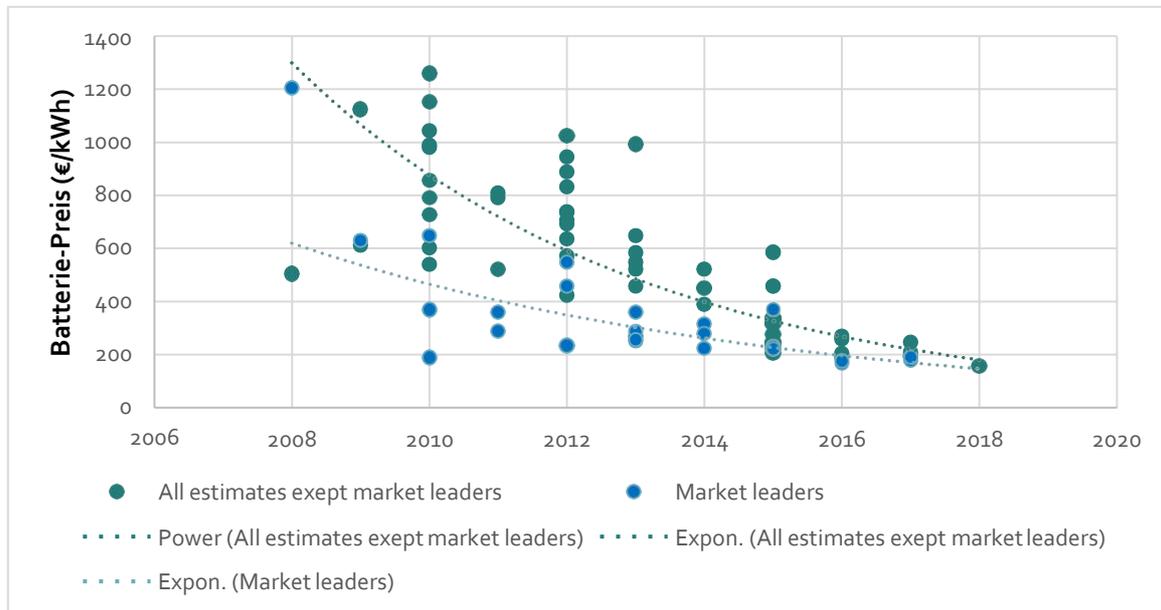


Abbildung 32 Schätzungen der Kosten für Li-Ion-Akkus

Quelle: basierend auf den Daten in Nykvist B. 2018 und verschiedenen Review-Artikeln (Anhang A.5)

Die Abbildung 32 zeigt eine Übersicht über 91 verschiedene Batteriekostenannahmen, die für den Zeitraum 2008–2018 gemeldet wurden, um die Kosten von Li-Ionen-Akkus für Hersteller von Elektrofahrzeugen zu ermitteln. Die Grafik zeigt, dass die Kosten sinken, jedoch mit großen Unsicherheiten in Bezug auf vergangene, aktuelle und zukünftige Kosten der dominierenden Li-Ionen-Technologie.

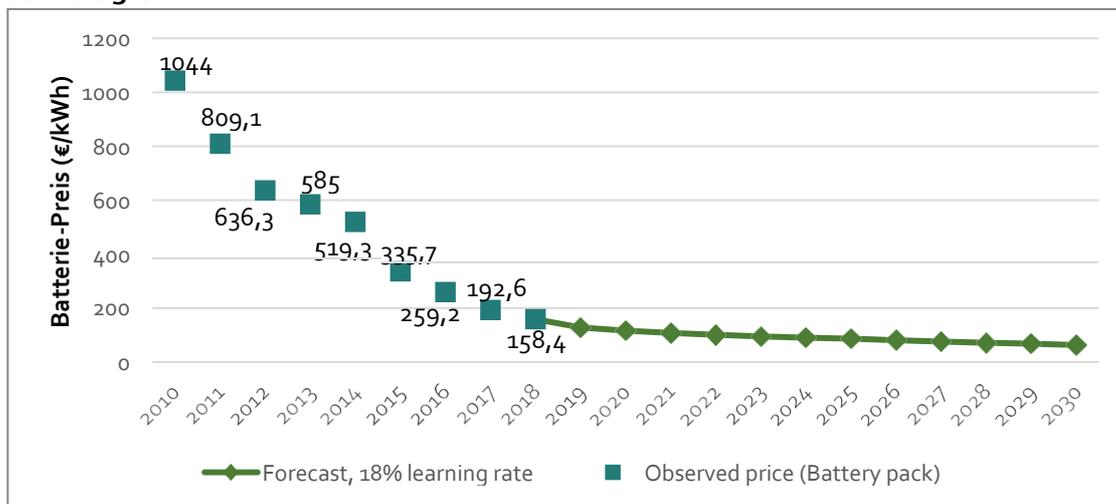


Abbildung 33 Ergebnisse der BNEF-Preiserhebung für Lithium-Ionen-Batterien, mit Prognose von 2019-2030

Die Bloomberg New Energy Finance (BNEF) -Studie 2017 zeigt verlässliche Batteriepreisdaten, die in mehreren Veröffentlichungen immer wieder erwähnt werden und Prognosen bis 2030 enthalten. Die von der BNEF erstellte Umfrage über Unternehmen, die für Lithium-Ionen-Batterien tätig sind, hat ergeben, dass der gewichtete Durchschnittspreis von Lithium-Ionen-Batterien bei 192,6 € / kWh liegt. Dies umfasst Preisdaten von Batterie-

Elektrofahrzeugen, Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeugen, E-Bussen und stationären Speichern. Der Preis für Akkumulatoren insgesamt ist seit 2016 um 24% und seit 2010 um 79% gesunken.

Die historische Lernrate für EV-Lithium-Ionen-Batteriepreise von 2010 bis 2017 lag bei rund 18%. Dies bedeutet, dass wir für jede Verdoppelung des kumulierten Volumens eine Kostensenkung von 18% feststellen. Auf dieser Grundlage sinken die erwarteten Batteriepreise weiter und erreichen im Jahr 2025 86,4 € / kWh (96 \$ / kWh) und im Jahr 2030 63 € / kWh (70 \$ / kWh). Die Lernrate wird für die folgende Berechnung der TCO beibehalten.

Es gibt jedoch eine große Lücke zwischen den Kosten für Batteriepacks in der Fachliteratur und den tatsächlichen Lieferpreisen auf dem realen E-Bus-Batteriemarkt. Angesichts der fortschreitenden Speichertechnologie werden in allen Studien schnelle Preisrückgänge hervorgehoben, aber der tatsächliche Marktpreis für Batterien, die beim Kauf von Bussen verwendet werden, ist weit vom aktuellen Wert in den Literaturquellen entfernt. Ein weiteres Problem ist, dass der Preis der Batterie häufig mit der Batterie im persönlichen Elektrofahrzeug und im Bus gemischt wird. E-Busse mit größeren Kapazitäten haben unterschiedliche tatsächliche Preise.

Wert	Einheit	Jahr	Kommentar	Referenz
1.000	€/kWh	2015	Batterie	Jens Plambeck, 2015. Information om genomförd behovsanalys av övergång till eldriven busstrafik
1200	€/kWh	2015	90 kWh Kapazität (60% effektiv) für induktive und leitende Ladesysteme	Alexander Kunith, 2017. Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs. Tabelle 4-6, pg. 142
600	€/kWh	2015	315 kWh Kapazität (85% effektiv) für das Plug-In-Ladesystem über Nacht	Alexander Kunith, 2017. Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs. Tabelle 4-6, pg. 142
800	€/kWh	2017		Vepsaelaeinen, Jari 2018. Cost-Benefit Analysis of electric bus fleet with various operation intervals. Table II, pg. 1524
600	€/kWh	2018	230 kWh Batterie, LFP-Chemie. Hohe Kapazität / geringer Stromverbrauch.	Fabian Meishner 2018 Introduction of Battery Electric Buses in European Cities. Table VII, pg. 5
1.000	€/kWh	2018	200 kWh Batterie, LFP-Chemie. Mittlere Kapazität / Mittlere Leistung.	Fabian Meishner 2018 Introduction of Battery Electric Buses in European Cities. Table VI, pg. 4
1.500	€/kWh	2018	125 kWh Batterie, LTO-Chemie. Geringe Kapazität / hohe Leistung.	Fabian Meishner 2018 Introduction of Battery Electric Buses in European Cities. Table V, pg. 3
667	€/kWh	2019	12 m Bus 250 k € Preis für einen 375 kWh Akku	https://www.bus2bus.berlin/en/Blog/E-BusesManufacturersAreDelivering/

Table 17 Batterie-Realmarktpreis

In Tabelle 17 liegen die tatsächlichen Marktpreise für Hochleistungsbatterien im Jahr 2018 zwischen 600 und 700 € / kWh. Batterien mit geringer Kapazität, die üblicherweise zum Laden über Pantographen verwendet werden, kosten zwischen 1000 und 1200 € / kWh. Dieser Wert wurde bereits bei Gesprächen mit verschiedenen E-Bus-Herstellern bestätigt und als tatsächlicher Preis ermittelt. Es werden die Batteriepreise der Marktrecherche in der folgenden TCO angesetzt.

4.2.1.3 Ladestation

Die Kosten für Ladestationen können je nach Ladesystem stark variieren. Diese Arbeit befasst sich mit der Analyse der Kosten für die Depot- und Pantograph-Ladestation. Das drahtlose Laden steckt noch zwischen der Forschungs- und Vermarktungsphase und wurde hier, aufgrund mangelnder Marktfähigkeit im Vergleich zu den beiden anderen Lademethoden, von der Analyse ausgeschlossen.



Abbildung 34 Depot-Ladestation⁴ (links), Laden über Pantographen⁵ (Mitte), kabelloses Laden⁶ (rechts)

Die Kosten für den Bau einer Ladestation werden berechnet, indem die Hardwarekosten der Ladestation, die Installationskosten, die Kosten für den Netzanschluss, die Genehmigungskosten, die Planungskosten und die Kosten für den Transformator addiert werden. Mehrere Veröffentlichungen befassen sich mit dem Anschluss der Ladestation an das Bahnnetz sowie mit dem Anschluss an das öffentliche Netz. Der Anschluss an das Bahnnetz wird hier jedoch nicht behandelt, es kann aber davon ausgegangen werden, dass dieser kostengünstiger ist.

⁴ YORK'S PARK & RIDE TO BE FULLY CHARGED, JorAir, 31.08.2017

⁵ http://www.stemann.com/en/products/charging_systems/chargingpanto_for_e_busses

⁶ American Physical Society

Kategorie	Wert	Einheit	Kommentar
Komplette Hardware, inkl. Kommunikations- und intelligentem Zähler	25.000	€	Basierend auf das Jahr 2015
Installations- / Baukosten / Beschilderung	3.500	€	
Netzanschlusskosten	5.000	€	
Autorisierung / Planung / Standortsuche	1.500	€	
Stromwandler	9.000	€	
Gesamtkosten der Ladestation	44.000	€	

Tabella 18 Ausfallkosten der Depot-Ladeinfrastruktur für 2015⁷

Mehrere Reviews zu Literaturrecherchen haben ergeben, dass die Einrichtungskosten für Gleichstromladestationen je nach Standort zwischen 20.000 € und 30.000 € liegen. Die Hardwarekosten, einschließlich intelligenter Zähler, werden bis 2020 voraussichtlich 15.000 € betragen. Weitere Informationen sind im Anhang A-4.6 zu finden. In Einzelfällen können die Einrichtungskosten jedoch auch deutlich höher sein. Insbesondere die Netzanschlusskosten können je nach Stadt erheblich variieren.

Kategorie	Wert	Einheit	Kommentar
Ladestation	170.000	€	
Installationskosten	95.000	€	
Baukosten	75.000	€	
Kupplungssystem	18.500	€	
Stromwandler	60.000	€	
Gesamtkosten der Ladestation	418.500	€	SCHUNK GmbH

Tabella 19 Ausfallkosten der Pantograph-Ladeinfrastruktur⁸

Die Pantographen-Ladestation ist fast zehnmal teurer als die zuvor beschriebene Depot-Ladestation. Wenn man bedenkt, dass sich 10 Busse eine Pantographen-Ladestation teilen, ergibt sich insgesamt ein günstigerer Preis. Es ist jedoch erforderlich, die Buspläne anzupassen, um unterschiedliche Zeitpunkte für das Laden mit demselben Ladegerät zu gewährleisten. Für den Fall das weniger als 10 Busse fahren, ist es außerdem schwierig, die sinkenden Preise auszunutzen. Der wichtigste Vorteil des Ladens mit einem Pantographen ist, dass er mit einer geringeren Batteriekapazität auskommt und daher bei den Batteriepreisen konkurrenzfähig sein kann. Für den Fall das der Buslinie eine lange Strecke pro Tag zugewiesen ist, kann sie möglicherweise nachts nicht mit einer einzigen Aufladung betrieben werden. Das Laden über einen Pantographen mit einer Hochgeschwindigkeitsladung von 300-450 kW für 2-3 Minuten pro Stunde sichert die Flexibilität beim Betrieb des Elektrobusses.

⁷ Charging Infrastructure for Electric Vehicles in Germany – Status Report and Recommendations 2015

⁸ Fabian Meishner 2018 Introduction of Battery Electric Buses in European Cities. Table V, pg. 3

4.2.2 OPEX

Die hier behandelten Betriebsausgaben (OPEX) umfassen die Kosten für Strom, Wartung von Bussen und Ladestationen.

4.2.2.1 Strompreis in Deutschland

Die Entwicklung des Strompreises hat erhebliche Auswirkungen auf den Elektrobusmarkt. Die folgende Grafik zeigt die Strompreisanalyse des BDEW für das Jahr 2019 und die Zukunftsaussichten unter Berücksichtigung der EEG-Umlage. Die Strompreise bis 2019 entsprechen den Preisen für Unternehmen mit einem Jahresverbrauch von 160 MWh bis 20 GWh.

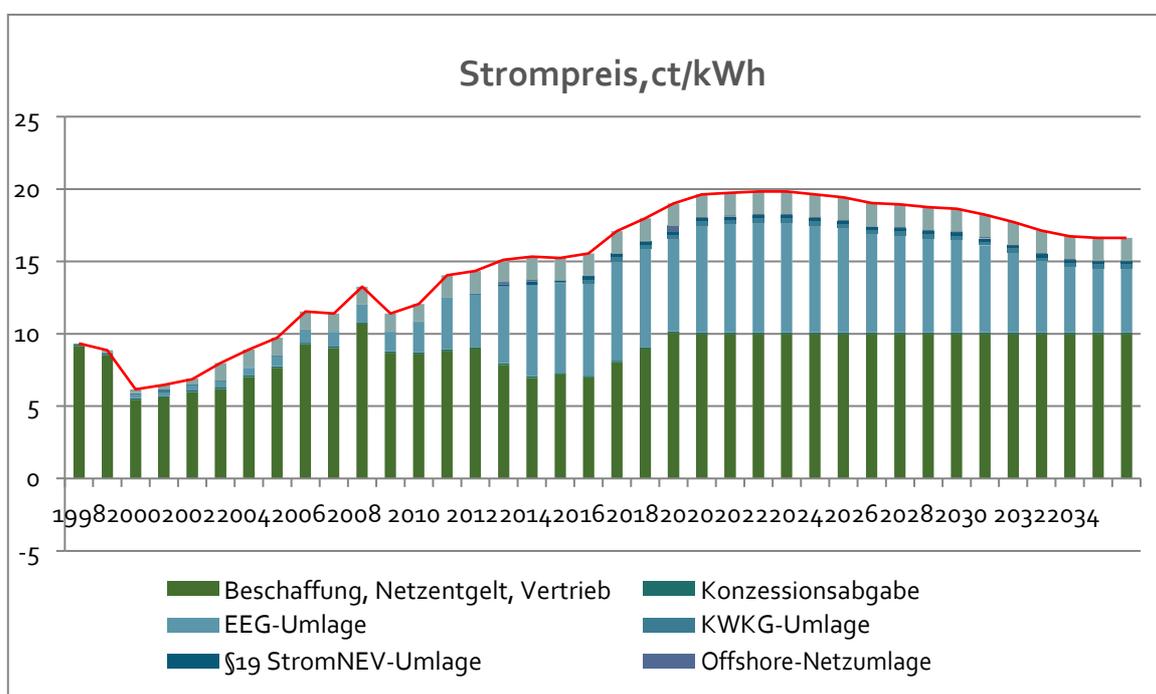


Abbildung 35 BDEW-Strompreisanalyse 1998-2019 und Änderungen der EDE-Umlage bis 2035 (Anhang A.8)

Die Liberalisierung des deutschen Strommarktes im Jahr 1998 löste einen Optimierungs- und Effizienzschub in der Elektrizitätswirtschaft aus und führte zunächst zu einer deutschlandweiten Preissenkung. Das Wachstum der weltweiten Energienachfrage führte jedoch bis zum Herbst 2008 zu einem deutlichen Preisanstieg. Infolge der Wirtschaftskrise 2009 sanken erstmals die Strompreise für Industriekunden.

Dem rückläufigen Preistrend standen jedoch gestiegene staatliche Belastungen gegenüber: Die Steuern und Abgaben auf eine Kilowattstunde Strom für ein Industrieunternehmen nach EEG, KWKG, die §19 StromNEV-Umlage, die Offshore-Netzabgabe und die Konzessionsabgabe blieben im Jahr 2019 mit rund 7,4 Cent pro kWh hoch.

Bis 2019 sind die Strompreise gestiegen, der Hauptgrund für die Steigerung in den letzten Jahren war die EEG-Umlage. Insbesondere im Zeitraum von 2012 bis 2015 war die EEG-Umlage stark von Verschiebungseffekten zwischen den Jahren geprägt. In Anbetracht der Erwartung eines hohen EEG-Kontenüberschusses ist davon auszugehen, dass der Aufschlag für die Zukunft im Wesentlichen stabil bleibt. Für die Folgejahre werden

zwei wichtige Ausgabenposten das Zuschlagsniveau beeinflussen: erstens, die Einspeisevergütungen für bestehende Anlagen, die bis 2020 nahezu konstant bleiben und dann bis 2035 auf null sinken; zweitens, die Einspeisevergütungen für Neuanlagen mit erheblich niedrigeren Einspeisevergütungen, die die bestehenden Anlagen bis 2035 vollständig ersetzen werden.

4.2.2.2 Wartungs- und Betriebskosten

Die Wartungs- und Betriebskosten (W&B-Kosten) gehören zu den wichtigsten Kostenbestandteilen der in der TCO-Analyse verwendeten Buskonzepte. Die W&B-Kosten gliedern sich weitgehend in Busse und Ladestationen. Die Arbeitskosten sind ausgeschlossen, da die Fahrzeit unabhängig vom Bustyp gleich ist.

Kategorie	Wert	Einheit	Referenz
E-Bus W&B Kosten	0,183	€/km	O. Olsson, 2016
	0,0436	€/km	O. Topal, 2018
	0,11	€/km	ICCT 2017
Ladestation W&B Kosten	0,14	€/kWh	TNO 2018

Tabelle 20 W&B-Kosten für E-Bus und Ladestation

Die Wartungs- und Betriebskosten für Busse umfassen die Kosten für die Erneuerung von Reifen, Bremsen und anderem Zubehör, die Kosten für die regelmäßige Inspektion und Reparatur von Bussen sowie die Kosten für die Inspektion von Batteriemodulen oder Elektromotoren bei Batteriebussen. In vielen Literaturstellen sind die W&B-Kosten für Dieselbusse höher.

4.3 Fallbeispiel Offenburg: Betriebsbedingungen

In der Stadt Offenburg verkehren an Wochentagen 16 12-m-Busse und zwei Gelenkbusse. Die Buslinien wurden analysiert und die TCO-Modelle wurden aufgestellt, indem 2 Varianten untersucht wurden. Zum einen die Nachtladung im Depot (zwei Busszenarien) und zum Vergleich die Pantograph-Ladung inkl. einer Nachtladung im Depot (zehn Busszenarien). Jedes Szenario basiert auf den Jahren 2019 und 2027, in dem der E-Bus in Offenburg eingeführt werden könnte. Die Stadt Offenburg wird ab 2027 einen neuen Vertrag über den Stadtbuss unterzeichnen. Als Reaktion auf die Nachfrage der Bürger nach emissionsfreien Bussen und den Trend anderer Städte, die auf E-Bus- oder Wasserstoffbusse umsteigen, erwägt die Stadt Offenburg die Einführung eine neue Art von Bussen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen.

4.3.1 Szenario Depotladung

4.3.1.1 Buslinieninformationen

Batterie-Elektrobusse werden aufgrund der begrenzten Reichweite in der Regel als Stadtbusse eingesetzt. Das Fahren in der Stadt ist geprägt durch beschleunigen und

bremsen. Aus diesem Grund ist der Batterie-Elektrobus dem Diesel-Bus überlegen, da er in Bremssituationen den größten Teil der kinetischen Energie zurück in die Batterien laden kann. Die Stadtbusse Offenburg S5 und S7 sind die kürzesten aller Buslinien in Offenburg und weisen selten hohe Hügel auf, so dass sie sich ideal für batterieelektrische Busse eignen.

<i>Linieninformation</i>	<i>Mo-Fr</i>	<i>Sam</i>	<i>Einheit</i>
<i>Tagesdistanz</i>	<i>169</i>	<i>125</i>	<i>km/Tag/Fahrzeug</i>
<i>Benötigte Kapazität (Kraftstoffverbrauch: 1,1 kWh/km)</i>	<i>185,9</i>	<i>137,5</i>	<i>km/Tag/Fahrzeug</i>
<i>Erforderliche Akkukapazität</i>	<i>260</i>	<i>200</i>	<i>kWh/Tag/Fahrzeug</i>
<i>Anzahl der Tage pro Jahr</i>	<i>261</i>	<i>52</i>	<i>Tag</i>
<i>Anzahl der Busse</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>Fahrzeug</i>
<i>Gesamtlänge pro Jahr</i>	<i>94718</i>		<i>km</i>
<i>Gesamtkapazität pro Jahr</i>	<i>146120</i>		<i>kWh</i>

Tabelle 21 Buslinieninformation für Linie S5 und S7

Bei der Depotladung kann der Buswechsel Linie für Linie erfolgen. Die als geeignet erachteten S5- und S7-Linien sind jeweils geteilte Busse, welche an Wochentagen mit zwei Busse fahren. Der Bus fährt 169 km pro Tag, benötigt eine Batteriekapazität von 185,9 kWh bei einer Kraftstoffeffizienz von 1,1 kWh. Da die Depotladung die Busnutzung maximiert, indem die Busse einmal täglich nachts aufgeladen werden, ist aus Sicherheitsgründen eine zusätzliche Kapazität erforderlich, selbst wenn die erforderliche Gesamtkapazität 185,9 kWh beträgt. Aus diesem Grund die Batteriekapazität von 260 kWh für diese beiden Linien angesetzt.

4.3.1.2 Kostenannahmen

In Absatz 4.2 wurden durch Literaturrecherchen verschiedene Daten zu den Parametern gesammelt, die sich auf die Gesamtbetriebskosten auswirken. Basierend auf den zugrundeliegenden Daten wurde das Basismodell ermittelt.

Kategorie	Wert	Einheit	Kommentar
E-Bus-Kosten, <i>IO</i>	250.000	€	Optimistisch
	300.000	€	Grundmodell
	350.000	€	Pessimistisch
Lebensdauer, <i>n</i>	15	Jahr	Optimistisch
	12	Jahr	Grundmodell
	10	Jahr	Pessimistisch
Zinssatz, <i>i</i>	4%		
Annuitätenableitungsrate	0,10655		12 Jahre
E-Bus-Kosten pro Jahr	26638,043	€	Optimistisch
	31965,652	€	Grundmodell
	37293,260	€	Pessimistisch

E-Bus-Kosten pro gefahrenem Kilometer	0,281	€/km	Optimistisch
	0,337	€/km	Grundmodell
	0,394	€/km	Pessimistisch
E-Bus-Kosten (2 Stück)	0,562	€/km	Optimistisch
	0,675	€/km	Grundmodell
	0,787	€/km	Pessimistisch

Tabelle 22 Kostenannahmen Bus

In Tabelle 22 werden die Preise von Busfahrzeugen bezüglich grundlegender / optimistischer / pessimistischer Modelle analysiert. 250.000 Euro ist derzeit der durchschnittliche E-Bus-Preis der chinesischen Hersteller, 300.000 Euro der durchschnittliche Preis der gesamten Buspreise und 350.000 Euro der durchschnittliche Preis aus der hohen Preisgruppe. Die Lebensdauer der Busse variiert zwischen 10 und 20 Jahren. Unter Berücksichtigung der gesamten Forschungsergebnisse sind 12 bis 13 Jahre als Lebensdauer des E-Busses angemessen. Bei einer Laufzeit von 12 Jahren und einem Zinssatz von 4% belaufen sich die Kosten für einen Bus pro Jahr auf rund 32.000 Euro. Mit den Linienanalysedaten wurden die Buspreise pro gefahrener Strecke für zwei Busse berechnet.

Kategorie	Wert	Einheit	Kommentar
Batteriekosten pro Kapazität	158,4	€/kWh	Market Preis (Bus2Bus)
	86,4	€/kWh	BNEF 2019
Batteriekosten, <i>IO</i>	41.184	€	Bus2Bus
	22.464	€	BNEF 2019
Lebensdauer, <i>n</i>	7	Jahre	Optimistisches
	6	Jahre	Basic Modell
Zinssatz, <i>i</i>	4%		
Annuitätenableitungsrate	0,191		6 Jahre
Batteriekosten pro Jahr	7856,338	€	Bus2Bus
	4285,275	€	BNEF 2019
Batteriekosten pro Jahr	0,083	€/km	Bus2Bus
	0,045	€/km	BNEF 2019
Batteriekosten (2 Stück)	0,166	€/km	Bus2Bus
	0,090	€/km	BNEF 2019

Tabelle 23 Kostenannahmen Batterien

Die Batteriepreise wurden in zwei Szenarien unterteilt. Bei den vorher aufgezeigten Betrachtungen des Marktpreises von Batterien (vgl. Abbildung 32) lag dieser 2019 bei 600- 700 kWh / €, was einen großen Unterschied zu dem in den Daten der Batteriepreisstudie angegebenen Wert darstellt. Da die Marktpreise der aus der Studie abgeleiteten Preistendenz folgen, bleibt der Marktpreis für 2019 auf dem Preisniveau von 2011-2012. Der Marktpreis für die Batterie für das Jahr 2027 wird daher auf 158,4 kWh / € festgesetzt, welcher dem in der Studie von 2019 vorgeschlagene Preis entspricht.

Kategorie	Wert	Einheit	Kommentar
komplette Hardware, inkl. Kommunikation und intelligentem Zähler	25.000	€	basierend auf 2015
Installation/Gebäudekosten/Beschilderung	3.500	€	
Ladestation pro Einheit	28.500	€	
Ladestation (2 Einheiten)	57000	€	
Netzanschlusskosten	5.000	€	
Autorisierung / Planung / Standortsuche	1.500	€	
Stromwandler	9.000	€	
Gesamtkosten für 2 Depots	72.500	€	
Lebenszeit, n	10	Jahr	
Zinssatz, i	4%		
Annuitätenfaktor	0,1233		
Batteriekosten pro Jahr	8.938,5935	€	
Batteriekosten pro gefahrenen km	0,0944	€/km	

Tabelle 24 Kostenannahmen: 50kW Depot-Ladestation

Bei der Depot-Ladestation sollte 2 Einheiten installiert werden, um 2 Busse laden zu können. Die Kosten für Netzanschluss, Standortsuche und Transformator sind nicht für jede Station erforderlich, sodass zwei Stationsinstallationen einen kleinen Vorteil bieten. Für die Berechnung der jährlichen Gesamtinfrastrukturkosten wird die Lebensdauer auf 10 Jahre festgelegt, wobei der Zinssatz für Batterien und Busse 4% beträgt.

Kategorie	Wert	Einheit	Kommentar
Beschaffung, Netzentgelt, Vertrieb	10,05	ct/kWh	Basierend auf 2019
Konzessionsabgabe	0,11	ct/kWh	
EEG-Umlage	6,405	ct/kWh	
KWKG-Umlage	0,28	ct/kWh	
§19 StromNEV-Umlage	0,2	ct/kWh	
Offshore-Netzumlage	0,416	ct/kWh	
Umlage für abschaltbare Lasten	0,005	ct/kWh	
Stromsteuer	1,537	ct/kWh	
Summe	19,00	ct/kWh	
Benötigter Strom pro Jahr	27767	€	
Stromkosten pro gefahrenen km	0,2932	€/km	

Tabelle 25 Kostenannahmen: Strompreis

Die Strompreise für 2027 werden mit Ausnahme der EEG-Umlage auf den gleichen Wert für 2019 festgesetzt. In der Vergangenheit war vor allem die die EEG Umlage der Bestandteil des Strompreises, der die größten Schwankungen hatte.

Kategorie	Wert	Einheit	Kommentar
Bus W&B Kosten	0,183	€/km	O. Olsson, 2016
	0,0436	€/km	O. Topal, 2018
	0,11	€/km	ICCT 2017
Ladestation W&B Kosten	0,14	€/kWh	
	0,216	€/km	
W&B pro gefahrenen km	0,399	€/km	O. Olsson, 2016
	0,260	€/km	O. Topal, 2018
	0,326	€/km	ICCT 2017

Tabelle 26 Kostenannahmen: Wartungs- und Betriebskosten

Die Wartungs- und Betriebskosten lassen sich in zwei Kategorien einteilen: Busse und Ladestationen. Die W&B-Kosten für Busse wurden aus unterschiedliche Literaturquellen übernommen. Das Basismodell liegt hier bei 0,11 € / km, welches auf der ICCT 2017 vorgestellt wurde.

Kategorie	Wert	Einheit	Kommentar
Dieselsbus Kosten, I_0	250.000	€	
Lebenszeit, n	12	Jahr	
Zinssatz, i	4%		
Annuitätenableitungsrate	0,10655		12 Jahre
Dieselsbus Kosten pro Jahr	26638,043	€	
Dieselsbus Kosten pro gefahrenen km	0,281	€/km	
Dieselsbus Kosten (2 Einheiten)	0,562	€/km	

Tabelle 27 Dieselsbus OPEX Parameter, Vergleich der Gesamtkostenrechnung

Es wurde eine Parameteranalyse von Dieselsbussen durchgeführt, um die Gesamtbetriebskosten mit denen des Elektrobusses zu vergleichen. Der Durchschnittspreis eines Dieselsbusses liegt bei 250.000 €. In 2019 schätzten mehrere Hersteller, dass der Preis eines Elektrobusses (einschließlich Batteriepreise) doppelt so hoch ist wie der eines Dieselsbusses. Die geschätzten Preise im Jahr 2027 dürften sich, aufgrund der gesunkenen Batteriepreise, auf das 1,5-fache verringern.

Kategorie	Wert	Einheit	Kommentar
Fahrzeugeffizienz	0,3904	L/km	MCI 102DL3
Diesels Preis	1,24	€/L	
Diesels Kosten pro gefahrenen km	0,4841	€/km	
W&B Kosten pro gefahrenen km	0,2500	€/km	Olli Vilpo, 2015

Tabelle 28 Dieselsbus OPEX Parameter, Vergleich der Gesamtkostenrechnung

Ein wichtiger Parameter der Investitionskosten für Dieselsbusse ist der Dieselspreis. Der Dieselspreis in Deutschland für 2019 beträgt 1,24 €/L. Der Dieselspreis für den von der Stadt betriebenen öffentlichen Bus sollte sich vom Verkaufspreis unterscheiden, wurde jedoch unter der Annahme berechnet, dass der Verkaufspreis die W&B Kosten der Tankstelle

miteinschließt. Daher beziehen sich die hier dargestellten W&B-Kosten lediglich auf die Kosten des Busses.

4.3.2 Szenario Pantograph

Das Laden über einen Pantographen ermöglicht ein schnelles Laden mit hoher Leistung von 300 bis 450 kW, wodurch kurze Wartezeiten an Bushaltestellen möglich sind. Daher kann eine Ladestation ungefähr 10 Busse bedienen, sodass mehrere Buslinien ausgewählt wurden.

4.3.2.1 Buslinieninformation

Die Offenburger Stadtbuslinien S1-S9 wurden hinsichtlich der Ladung mit Pantographen analysiert. Regionalstrecken sind ausgeschlossen, da ihre langen Strecken weniger für den E-Bus geeignet sind.

Line	Dauer [min]	Länge [km]	Benötigte Kapazität [kWh] (1,1 kWh/km)	Ladezeit (Ladeenergie: 450kW)	Ladezustand 50% zu 70% (90kWh Batterie)
S1	29	7,5	8,25	weniger als 1 Minute	1 Stunde (2 Runden)
S2	26	7,7	8,47	weniger als 1 Minute	1 Stunde (2 Runden)
S3	27	8,9	9,79	weniger als 1 Minute	1 Stunde (2 Runden)
S4	32	7,3	8,03	weniger als 1 Minute	1 Stunde (2 Runden)
S5	12	2,6	2,86	weniger als 30 sec	1,5 Stunde (6 Runden)
S6	50	34	37,4	6 Minute	30% zu 80% (1 Runde)
S7	14	3,4	3,74	weniger als 30 sec	1,2 Stunde (5 Runden)
S8	52	16,6	18,26	2 Minute	1 Stunde (1 Runde)
S9	40	10,2	11,22	1-2 Minute	40 Minuten (1 Runde)

Tabelle 29 geschätzte Verfügbarkeit der Stadtbuslinien in Offenburg für gelegentliches Laden

Alle Stadtbusse fahren durch den Offenburger Hauptbahnhof in den ZOB. Die Zeit und Entfernung, um das Ziel zu erreichen und zum Hauptbahnhof zurückzukehren, ist für jede Linie unterschiedlich. S5 und S7 haben die kürzesten Strecken, wohingegen die von S6 und S8 zwei- bis viermal länger sind als andere Strecken. Aus diesem Grund wird mehr Kapazität für die Linien S6 und S8 benötigt und die Ladezeit verlängert sich im Vergleich zu den anderen Linien. Unter der Annahme, dass die Aufladung jedes Mal erfolgt, wenn der Bus am Hauptbahnhof ankommt, kann die Aufladung jeder Linie in einem Zeitintervall von zwei Minuten bis 30 Sekunden abgeschlossen sein. Die Aufladung der verbrauchten Kapazität der Linie S6 dauert beispielsweise sechs Minuten für eine Runde. Bei einer 450- kW-Ladestation dauert der Ladevorgang, für eine Akkukapazität von 90 kWh, zwei Minuten, um den Akkumulator von 50% auf 70% aufzuladen. Der Ladezustand, die Anzahl der Runden sowie die Ladezeit wurden in Tabelle 14 zusammengefasst.

Liniename	Entfernung [km]	Kapazität [kWh]	benötigte Anzahl Busse
Line S1, S2	257276	283003,6	4
Line S3	161518	177669,8	2
Line S4	148284	163112,4	2
Line S5, S7	94718	104189,8	2
Line S9	43373	47710,3	1
Gesamtstrecke pro Jahr	705169		km
Gesamtkapazität pro Jahr	775685,9		kWh
Gesamtanzahl	11		Busse

Tabelle 30 Entfernung und erforderliche Kapazität je Linie pro Jahr

Wie aus Tabelle 14 hervorgeht, sind die Linien S6 und S8 weniger gut für Elektrobusse geeignet und werden daher für die anschließende Analyse ausgeschlossen. Tabelle 15 zeigt die Entfernung, die jede Linie pro Jahr zurücklegt, sowie die erforderliche Kapazität. Insgesamt wurden 11 Busse für die Ladung mit Pantographen berücksichtigt.

4.3.2.2 Rentabilitätsparameter:

Die Hauptparameter, die sich auf den Preis der Ladung mit Pantographen auswirken, sind die gleichen wie bei der Depot-Ladung. Die CAPEX-Parameter wurden, gemäß den in Abschnitt 3 genannten Literaturhinweisen, geändert.

Kategorie	Wert	Einheit	Kommentar
Pantograph-Laden Kosten, l_0	330.000	€	
Basisbus	210.000	€	
Antriebssystem und Leistungselektronik	105.000	€	
Ladekomponenten busseitig	15.000	€	
Lebenszeit, n	13	Jahr	Basismodell
Zinssatz, i	4%		
Annuitätenableitungsrate	0,10014		13 Jahre
E-Bus Kosten pro Jahr	33047,430	€/Jahr	
E-Bus Kosten pro gefahrenen km	0,047	€/km	
E-Bus Kosten (11 Einheiten)	0,516	€/km	

Tabelle 31 Pantograph-Laden, E-Bus Kosten

Gegenüber dem Depot-Laden des E-Busses wird der Preis des Ladens mittels des Pantographen durch die Ladekomponente leicht erhöht. Der Grundpreis wurde auf 330.000 Euro festgesetzt, und es wurden insgesamt 11 Fahrzeuge nach Lebensdauer berechnet.

Kategorie	Wert	Einheit	Kommentar
Batteriekosten	300	€/kWh	
Benötigte Batteriekapazität	90	kWh	
Benötigte Batteriekosten, I_0	27.000	€	
Lebenszeit, n	6,5	Jahr	Grundmodell
	7	Jahr	optimistisch
	6	Jahr	pessimistisch
Zinssatz, i	4%		
Annuitätenableitungsrate	0,178		6,5 Jahre
Batteriekosten pro Jahr	4799,299	€	
Batteriekosten pro gefahrenen km	0,007	€/km	
Batteriekosten (11 Einheiten)	0,075	€/km	

Tabelle 32 Batteriekosten in 2027

Beim Laden mit Pantographen ist der Preis für eine Batterie pro Watt ungefähr doppelt so hoch wie der für das Laden in Depots. Da der erwartete Preis für Batterien für die Depot- Ladung im Jahr 2027 150 € / kWh beträgt, ist davon auszugehen, dass die Batteriepreise für eine Pantograph-Ladung 300 € / kWh betragen werden. Die Kapazität der Batterie, die an jedem Bus montiert werden soll, wird auf 90 kWh festgelegt, woraus der Preis für insgesamt 11 Batterien berechnet werden kann.

Kategorie	Wert	Einheit	Kommentar
Gesamtkosten Ladestation	418.500	€	SCHUNK GmbH
Stromwandler + Aufbau	60.000	€	
Installationskosten	95.000	€	
Baukosten	75.000	€	
Kupplungssystem	18.500	€	
Ladestation	170.000	€	
Lebenszeit, n	10	Jahre	
Zinssatz, i	4%		
Annuitätenableitungsrate	0,1233		
Infrastrukturkosten pro Jahr	51597,2602	€	
Infrastrukturkosten pro km	0,0732	€/km	

Tabelle 33 relevante Parameter für die Ladestation für Pantographen

Tabelle 33 zeigt die Kosten der Ladestation für Pantograph. Die Installationskosten können je nach Stadtsituation unterschiedlich sein, hier werden jedoch 95.000 Euro angenommen. Die gesamten Parameter werden jährlich zusammengefasst und abgeleitet. Die Kosten einer Ladestation für Pantographen sind mehr als zehnmals so hoch wie die Gesamtkosten einer Depot-Ladestation.

4.4 Ergebnisse und Diskussion

4.4.1 Szenario Depotladung

Die E-Bus TCO für die Offenburger Buslinien S5 und S7 wurden für die Jahre 2019 und 2027 durchgeführt. Die TCO-Szenarien für 2019 sind in fünf Kategorien unterteilt.

	[TCO 1] Grundmodell	[TCO 2] Optimistisches Modell	[TCO 3] Pessimistisches Modell	[TCO 4] Grundmodell	[TCO 5] Optimistisches Modell
Bus	Durchschnittskosten	Minimale Kosten	Maximale Kosten	Durchschnittskosten	Minimale Kosten
Batterie	Gleicher Wert			Günstige Batteriepreise nach BNEF	
Lade-station					
Strom-bezug					
W&B Kosten	Durchschnittskosten	Minimale Kosten	Maximale Kosten	Durchschnittskosten	Minimale Kosten

Tabelle 34 Übersicht der TCO-Szenarien 1-3

In den Varianten TCO 1, 2 und 3 wird das Batteriepreismodell als aktueller Marktpreis für Batteriebusse mit großer Kapazität übernommen. Die Unterschiede zwischen den Varianten TCO 1-3 sind die E-Bus-Kosten und die Wartungs- und Betriebskosten. In den Varianten TCO 4 und 5 wurde das Batteriepreismodell auf der Grundlage der jüngsten Studie des BNEF erstellt. Die Kosten für die Ladestation und die Stromkosten für das TCO- Modell 1-5 wurden gleichermaßen auf der Grundlage des Marktpreises von 2019 festgelegt.

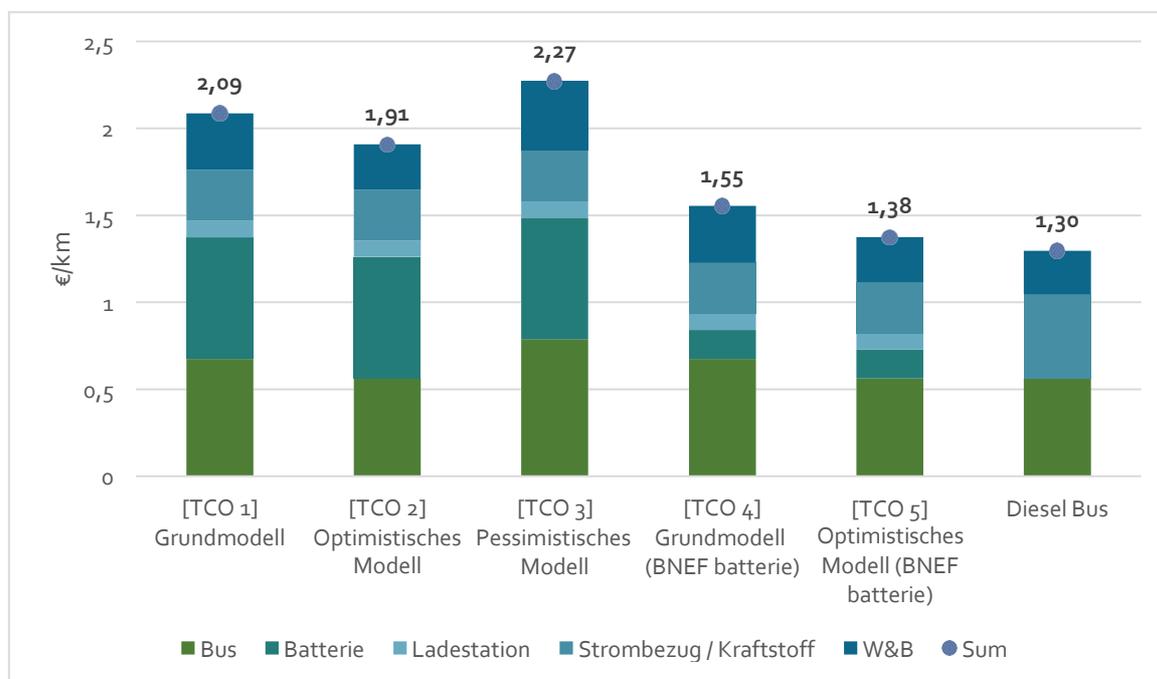


Abbildung 36 Ergebnisse für 2-Bus-Szenario von Linie S5 und S7 in 2019

Die Analyseergebnisse zeigen einen signifikanten Unterschied zum Diesibus von 1,30 € / km, während das TCO-Grundmodell für E-Busse bei 2,09 € / km liegt. Der Kostentreiber sind die Batteriekosten. Ein kürzlich veröffentlichter Bericht von BNEF zeigte, dass die Batteriepreise mehr als das Dreifache der Differenz zwischen dem Marktpreis und dem Ergebnis betragen, sodass die Ergebnisse mit Batteriepreisen ähnlich der TCO-Analyse von Dieselbussen mit 1,55 € / km sind.

In Abbildung 9 wird der Unterschied der geänderten Batteriepreise zwischen 2019 und 2027 ersichtlich. Im Jahr 2019, wenn der Marktpreis verwendet wird, machen die Batteriepreise den höchsten Anteil aller anderen Faktoren aus, aber im Jahr 2027 sinkt der Anteil der Batteriepreise laut Forschungstrends von 33% auf 11%. Da andere Faktoren werden im Jahr 2027 dann einen größeren Anteil einnehmen, insbesondere werden die Buskosten mit 43% zum höchsten Anteil.

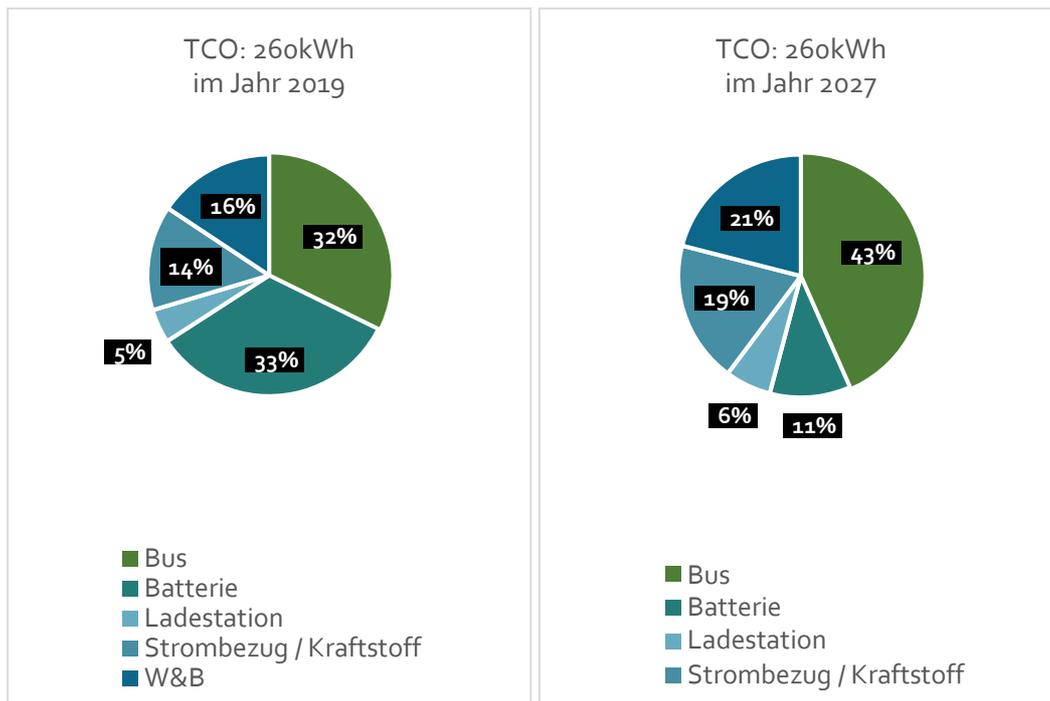


Abbildung 37 260 kWh Depotladestation, Komponentenanalyse des Basismodellszenarios im Jahr 2019 (links) und im Jahr 2027 (rechts)

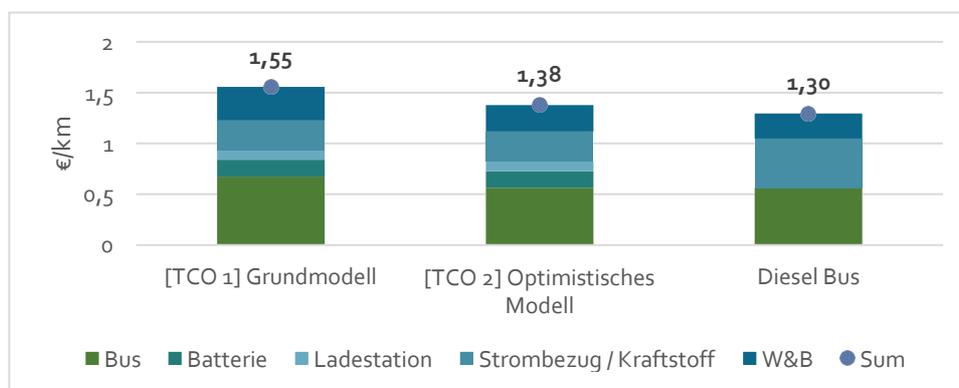


Abbildung 38 TCO-Szenarien für Linie S5 & S7 auf 2027

Abbildung 38 zeigt die TCO-Ergebnisse für Elektro- / Dieselbusse im Jahr 2027. Obwohl die Dieselpreise gestiegen und die Batteriepreise gesunken sind, liegt das Basismodell immer noch um 0,22 € / km höher als das des Diesel-TCO. Das zweite Modell, dass die optimistischen Preise für Busse und W&B übernimmt, resultiert in höheren Gesamtbetriebskosten als bei Dieselbussen.

4.4.2 Szenario Pantograph

Die TCO der Ladestation mit Pantographen von 2027 wurde für 11 Stadtbusse in Offenburg berechnet.

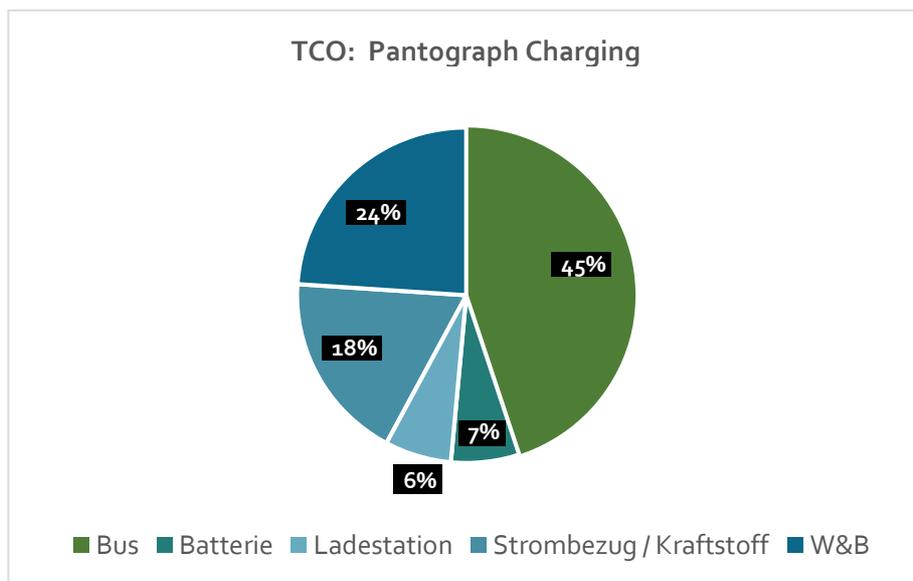


Abbildung 39 Ladestation für Pantograph, Grundmodell des TCO-Modellszenarios

COST CATEGORY [€/km/a]	
Kategorie 1: E-Bus	0,5155
Kategorie 2: Batterie	0,0749
Kategorie 3: Ladestation	0,0732
Kategorie 4: Elektrizität	0,2090
Kategorie 5: W&B	0,2746
Gesamtkosten	1,1472

Tabelle 35 Kostenbestandteile

Den größten Anteil an den Gesamtkosten haben die E-Bus-Kosten, gefolgt von W&B-Kosten und Strompreisen. Der Preis für die Batterie wird voraussichtlich 80% unter dem Preis von 2019 liegen, was den größten Einfluss auf die Preisänderungen hat.

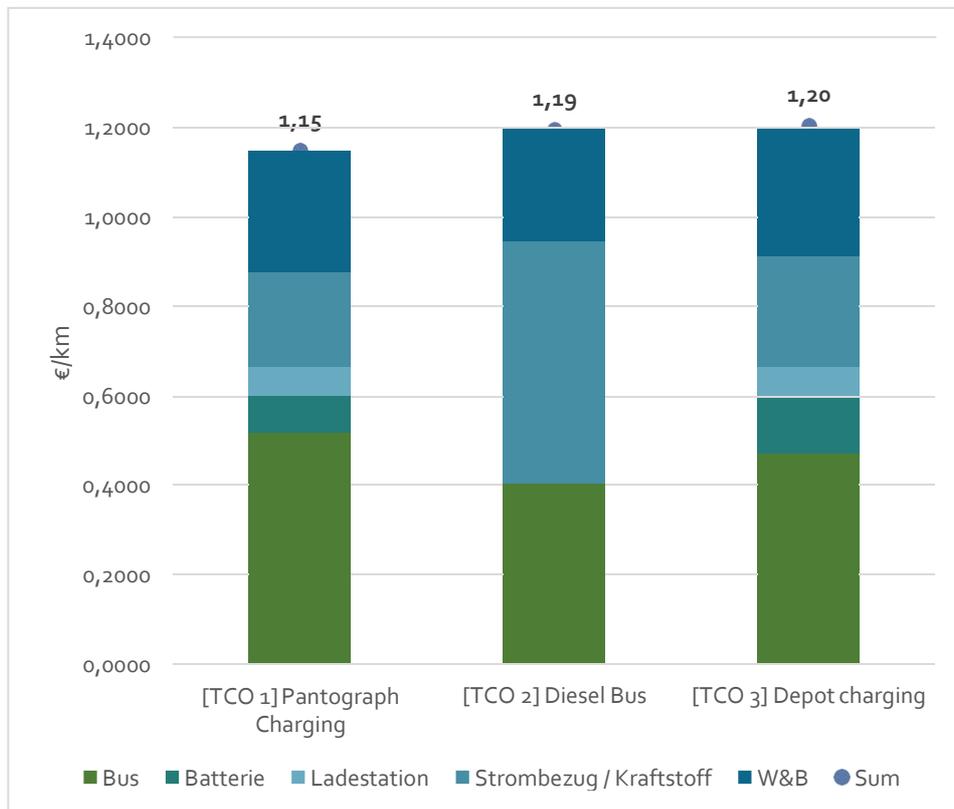


Abbildung 40 TCO Schätzung für ein 11 Busse Szenario in 2027

Die Ergebnisse für die Elektro- / Dieselbusse im Jahr 2027 lauten wie folgt: Am günstigsten ist der Pantographbus, gefolgt von Dieselbussen und Depotladebussen. Der Buspreis ist in der Variante des Pantograph-Ladens höher, aber aufgrund der Eigenschaften des Gelegenheitsladens wird weniger Strom benötigt, und es ist auch möglich, die Linie mit weniger Batteriekapazität auszustatten, was zu niedrigeren Gesamtbetriebskosten führt. Dies ist auch etwas weniger (0,02 € / km) als die Gesamtbetriebskosten von Dieselbussen und zeigt künftig preisliche Wettbewerbsfähigkeit.

4.5 Fazit und Ausblick

Die Analyseergebnisse zeigen für das Jahr 2019 einen signifikanten Unterschied der TCO vom Dieselbus (1,3 €/km) zu den TCO von E-Bussen (zwischen 1,9 und 2,27 €/km, je nach Szenario). Der Kostentreiber sind in den heutigen Szenarien die Batteriekosten. Hier ist anzumerken, dass es eine deutliche Diskrepanz zwischen veröffentlichten Batteriepreisen in der Literatur (Werte für Kosten pro Kapazität von ca. 200 €/kWh) und den Batteriepreisen aus der Marktrecherche (Werte für Kosten pro Kapazität von ca. 600 €/kWh) gibt. Eine Depotladung im Vergleich zu einer Pantographladung hat heute aufgrund der hohen Batteriepreise keine wesentlichen Kostenvorteile. Im Jahr 2027, in dem in der Stadt Offenburg die Ausschreibung für den Stadtbusverkehr endet, gibt sich ein anderes Bild. E-Busse die mit der Möglichkeit einer Pantographladung ausgerüstet sind, werden hier die günstigsten TCO (1,17 €/km) aufweisen, gefolgt vom Dieselbus (TCO 1,15 €/km) und einem E-Bus mit Depotladung (TCO 1,2 €/km). Die Angaben werden hier als Robust eingestuft, da durchschnittliche Kostenannahmen sowohl bei den Elektrovarianten als auch beim Dieselbus angenommen wurden.

Es lässt sich festhalten, dass bei einer Batterie-basierten Lösung mit Pantograph-Schnellladung eine elektrische Umstellung im ÖPNV der Stadt Offenburg ohne größere Auswirkungen auf die Busflotte realisierbar ist. Falls genügend Knotenpunkte vorhanden sind, könnten auch Buslinien mit längerer Distanz umgesetzt werden. Der Aufwand für das Fahrplanmanagement wird allerdings steigen, da die Ladezeiten am Pantograph mit zu berücksichtigen sind und das Flottenmanagement um diesen Parameter erweitert werden muss. Allgemein lassen die Kosten-Prognosen für Batterie und Batterie-elektrischen Fahrzeuge eine signifikante Kostenreduzierung bis 2030 erkennen, die in manchen Konfigurationen zur Kostenparität und sogar geringeren Kosten als mit der Diesel-Variante führen kann.

5 Zusammenfassung

Für Verkehrsunternehmen stellt die Erprobung neuer Technologien eine große Herausforderung dar. Zum einem müssen sich Verkehrsunternehmen auf die emissionsfreie Mobilität der Zukunft vorbereiten und zum anderen dürfen auch solche Erprobungen die Dienstleistungsqualität nicht gefährden, zum anderen muss weiterhin einen Technologie-offener Betrieb gewährleistet werden.

Sowohl Wasserstoff-Busse als Batterie-Busse können ihren Beitrag zur Umstellung des ÖPNV auf emissionsfreie Mobilität leisten. Je nach Anwendungsmuster können sich beide Technologien gut ergänzen, und zu einem volkswirtschaftlichen Optimum führen. Es gilt, die Technologien im realen Umfeld zu erproben, um praxisnahe Erfahrung zu sammeln und dabei Mitarbeiter auszubilden, ohne die Qualität des Betriebs zu gefährden. Bei der aktuellen Kostenlage sehen beide Technologien ihre Einführung in den Betrieb mit Mehrkosten im Vergleich zu der aktuellen Diesel-Lösung verbunden.

Bei einer Batterie-basierten Lösung mit Pantograph-Schnellladung sind kürzere Linien gute Kandidaten für eine elektrische Umstellung ohne Auswirkungen auf der Größe der Busflotte. Auch Liniensystemen beliebiger Länge mit Knotenpunkten in regelmäßigen Abstände ermöglichen eine gemeinsame Nutzung der Ladeinfrastruktur, und stellen somit reduzierten Aufbaukosten der Ladeinfrastruktur in Aussicht. In diesen Fall sind aber auch Fahrplanmanagement-Aspekte hinsichtlich der Ladezeit am Pantograph mit zu berücksichtigen, die nicht Bestandteil dieser Studie gewesen sind. Allgemein lassen die Kosten-Prognosen für Batterie und Batterie-elektrischen Fahrzeuge eine signifikante Kostenreduzierung bis 2030 erkennen, die in manchen Konfigurationen zur Kostenparität und sogar geringeren Kosten als mit der Diesel-Variante führen würde.

Anders als für Batterie-Busse stellt die Linien-Konfiguration keinen wirtschaftlichen Einflussfaktor auf den Betrieb von Wasserstoff Bussen dar. Die derzeitige Reichweite der H₂-Busse reicht aus um die zu erwartende tägliche Fahrleistung zu decken. Bei der Wasserstoffmobilität sind aber die Versorgungsinfrastruktur und die damit verbundenen Kraftstoffkosten von entscheidender Bedeutung. Ihr Aufbau ist mit hohen Investitionskosten und gesetzlichen Verpflichtungen verbunden (BImSchG, BetrSichV), die für eine erste Erprobung der Technologie im kleinen Maßstab eine Hürde für Verkehrsunternehmen darstellen könnte. Die H₂ Mobility Deutschland bietet die Möglichkeit an, 700 bar Tankstellen mit einem 350 bar Modul zu erweitern, das die tägliche Versorgung von ca. 6 Busse ermöglicht. Mit begrenzten Risiken für die Verkehrsunternehmen bietet es sich daher an, die H₂ Mobilität auf eine limitierten Busflotte zu erproben. Da der Aufbau des H₂-Mobility Deutschland Tankstellennetz eine Lücke in Offenburg und Umgebung aufweist, wäre es vorstellbar an der Errichtung einer solchen Tankstelle zu arbeiten, die die Betankung und Erprobung von Wasserstoff Busse ermöglicht. Auf längerer Sicht ist die Sicherstellung einer gutplatzierten zuverlässigen und nachhaltigen Wasserstoffquelle von entscheidender Bedeutung. Derzeit liegen vorhandenen Wasserstoffquellen in mehr als 100 km Entfernung. Eine Nutzung der Wasserkraft des naheliegenden Rheins erscheint durchaus sinnvoll, sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus umwelt-technischen Gründen (erneuerbarer Strom,

Stromkostenreduzierung durch Eigenversorgung, kürzere Transportwege, möglicher Nutzen für die Eurometropole Straßburg).

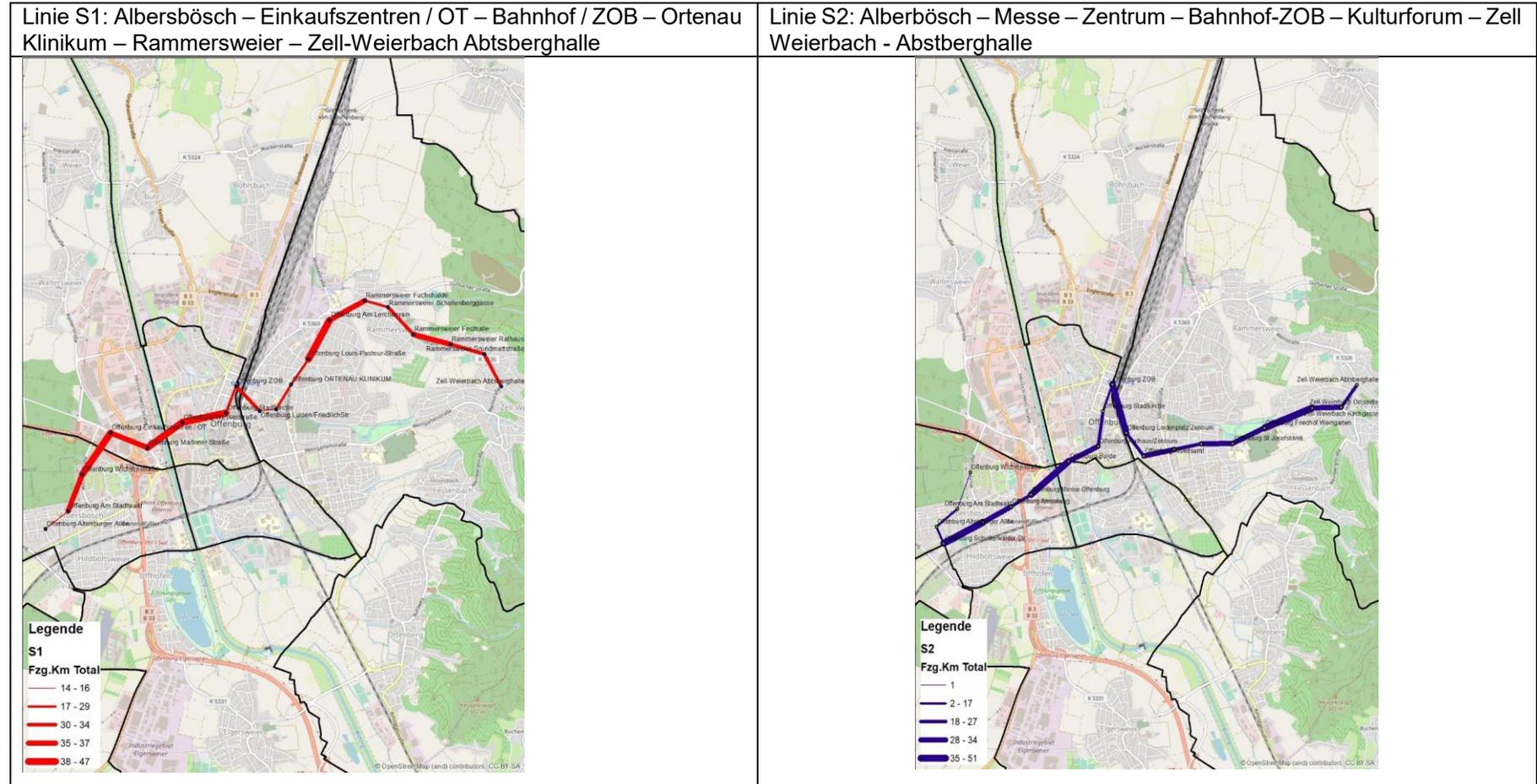
Es lässt sich festhalten, dass für die Region Offenburg zunächst die Erprobung beider Technologien, der Elektromobilität als auch der Wasserstoffmobilität, empfohlen wird. Es sollte zeitnah in den Erfahrungsaufbau mit beiden Technologien investiert werden. Zudem sollte bei der Elektromobilität das Flottenmanagement untersucht und evaluiert werden und bei der Wasserstoffmobilität die Möglichkeiten der Kooperation für den Aufbau der Wasserstofftankstelle. Im Rahmen der nächsten Ausschreibungsrunde für den öffentlichen Nahverkehr in Offenburg wird empfohlen diesen emissionsfrei auszuschreiben. Es ist absehbar, dass aus Kostengründen (Kostenparität der Elektromobilität mit der Dieselvariante) als auch aus Gründen der Anforderung bzgl. der Emissionsgrenzwerte der ÖPNV emissionsfrei umgesetzt werden sollte.

6 Anhang

A.1	Strukturanalyse	68
A.2	Akzeptanz Umfrage: Charakterisierung der Stichprobe.....	77
A.3	Litteraturverzeichnis API	78
A.4	Batterieelektrische Umsetzung.....	79

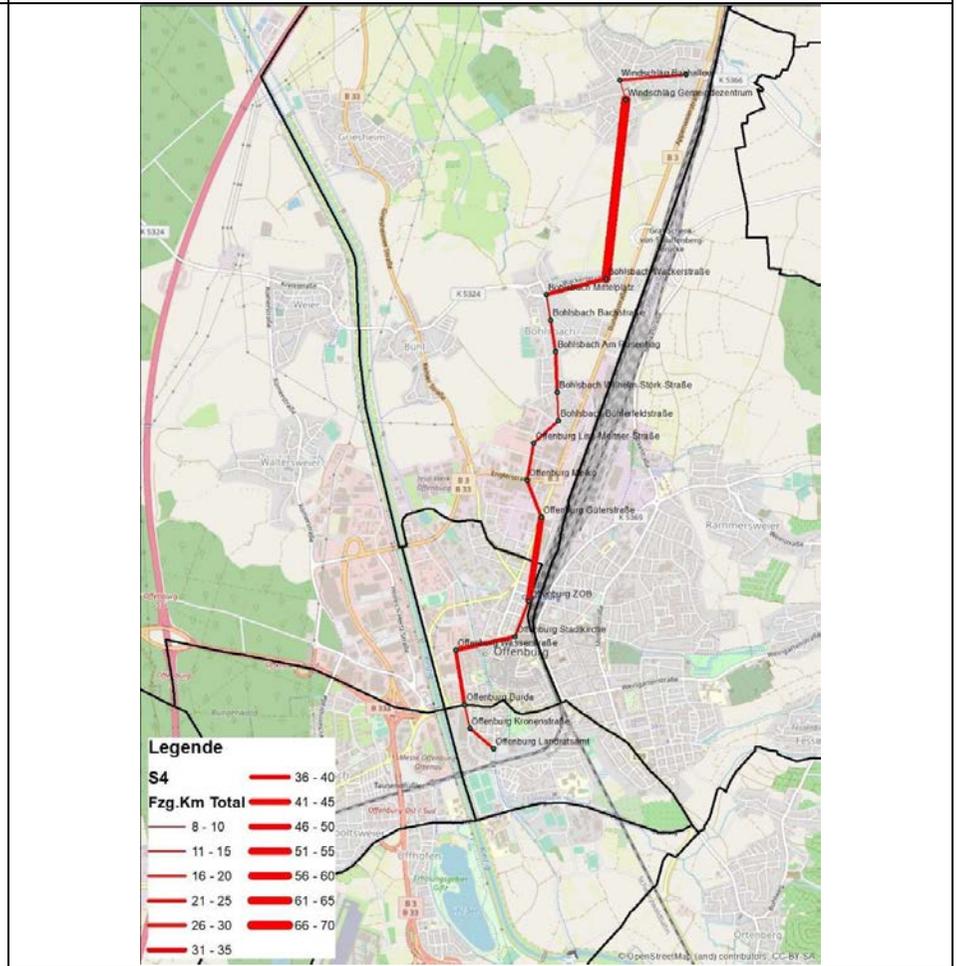
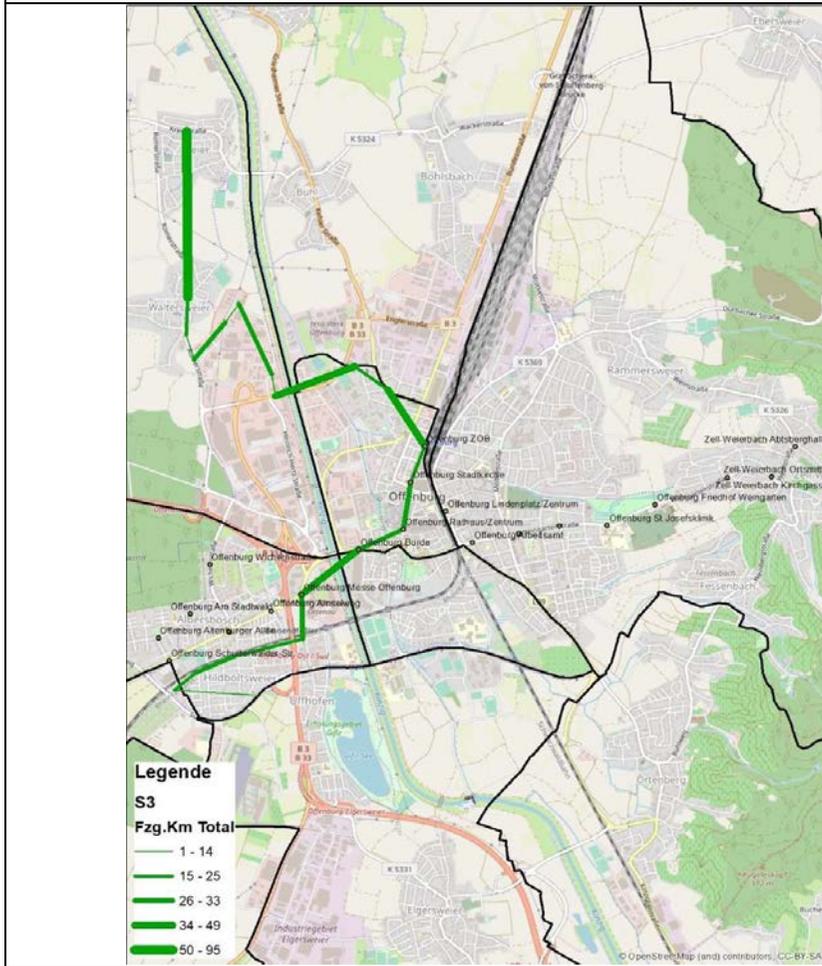
A.1 Strukturanalyse

Quelle: eigene Darstellung, SWEG, RVS, zHV

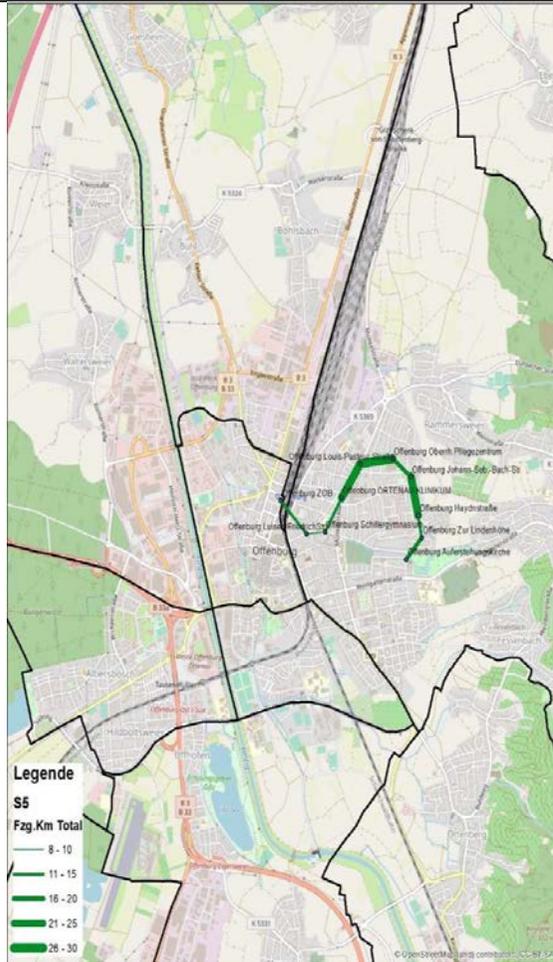


Linie S3: Hildboltsweier – Messe – Zentrum – Bahnhof/ZOB – Waltersweier - Weier

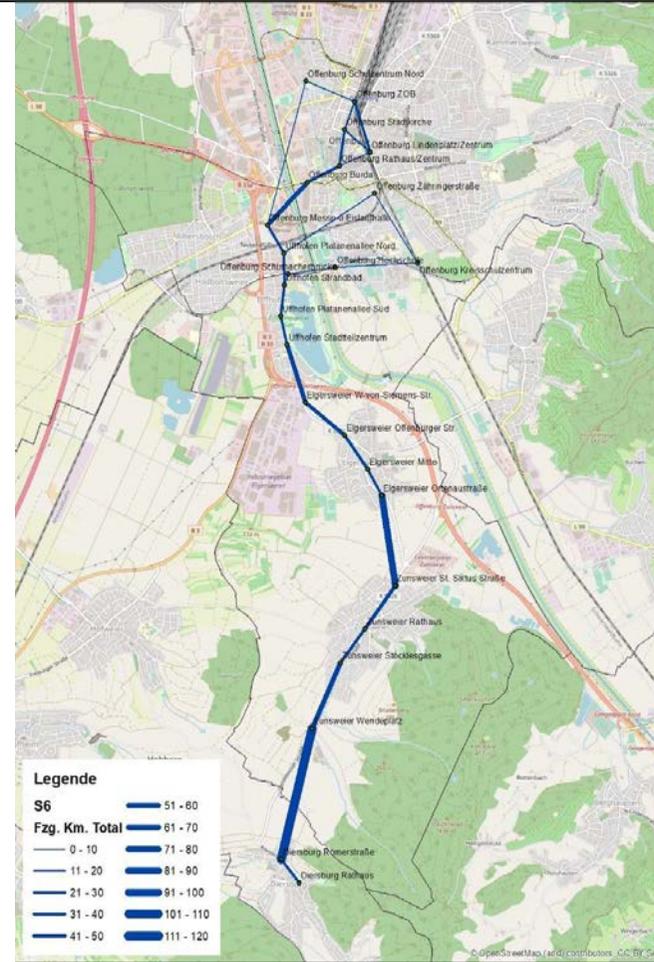
Linie S4: Windschlag – Bohlsbach – Bahnhof/ZOB – Landratsamt



Linie S5: Bahnhof / ZOB – Ortenau Klinikum – Oberrh. Pflege-Therapiezentrum – Aufstehungskirche

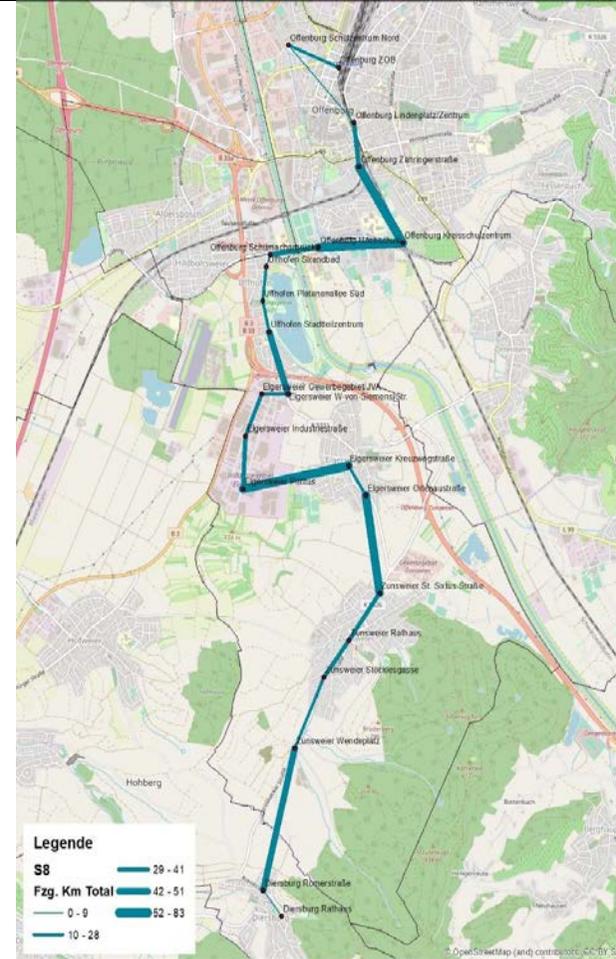


Linie S6: Bahnhof / ZOB – Zentrum – Messe – Uffhofen – Eigersweier – Zunsweier – Diersburg



Linie S7: Bahnhof / ZOB – Zentrum – Kulturforum – Auferstehungskirche

Linie S8: Bahnhof / ZOB – Zentrum – Kreisschulzentrum – Hochschule – Uffhofen – Eigersweier



Linie S9: Schulzentrum Nord – Bahnhof / ZOB – Zentrum – Fessenbach – Zell-Weierbach Riedle



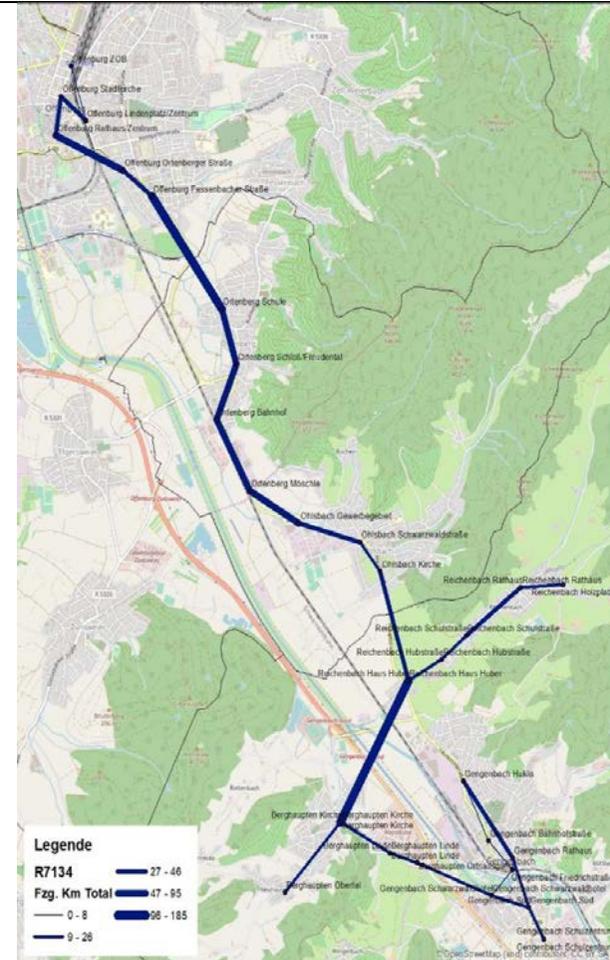
Linie 106: (Lahr – Offenburg -) Altenheim – Kehl



Linie 106_2: Schweighausen – Seelbach – Lahr – Altenheim (- Offenburg – Kehl)

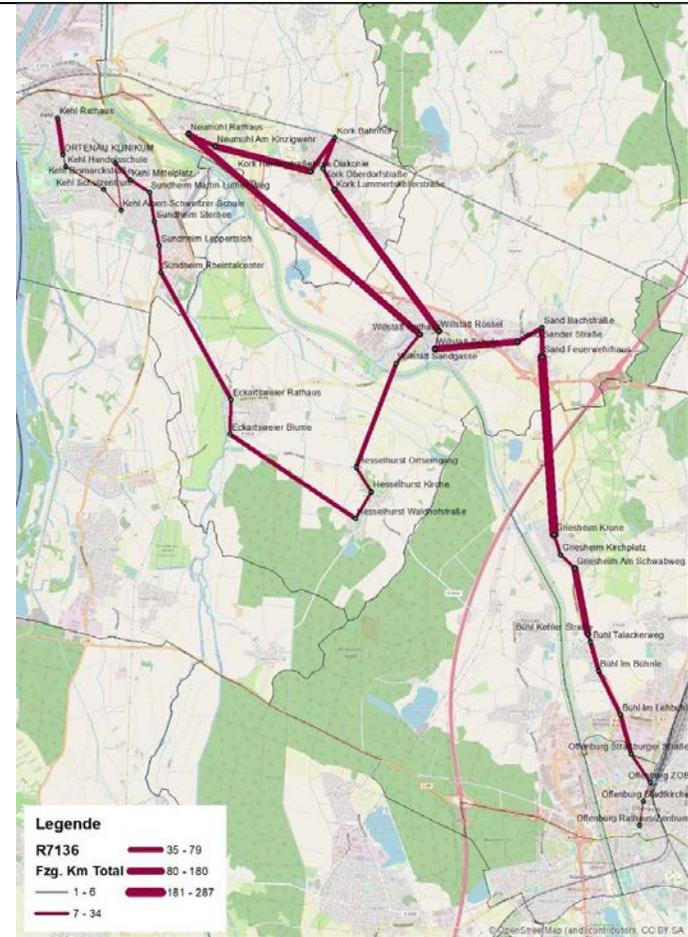
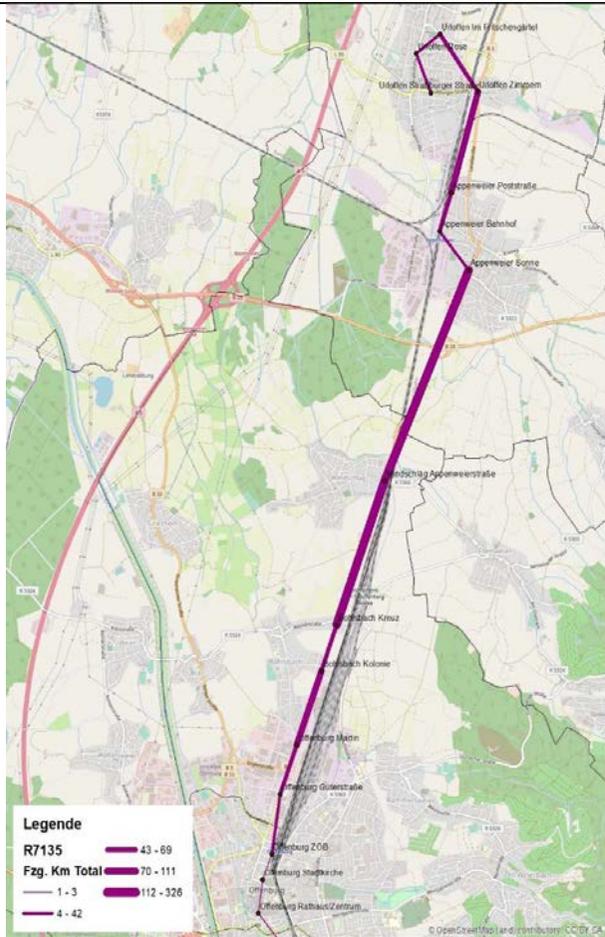


Linie 7134/60: Offenburg – Gengenbach – Berghaupten

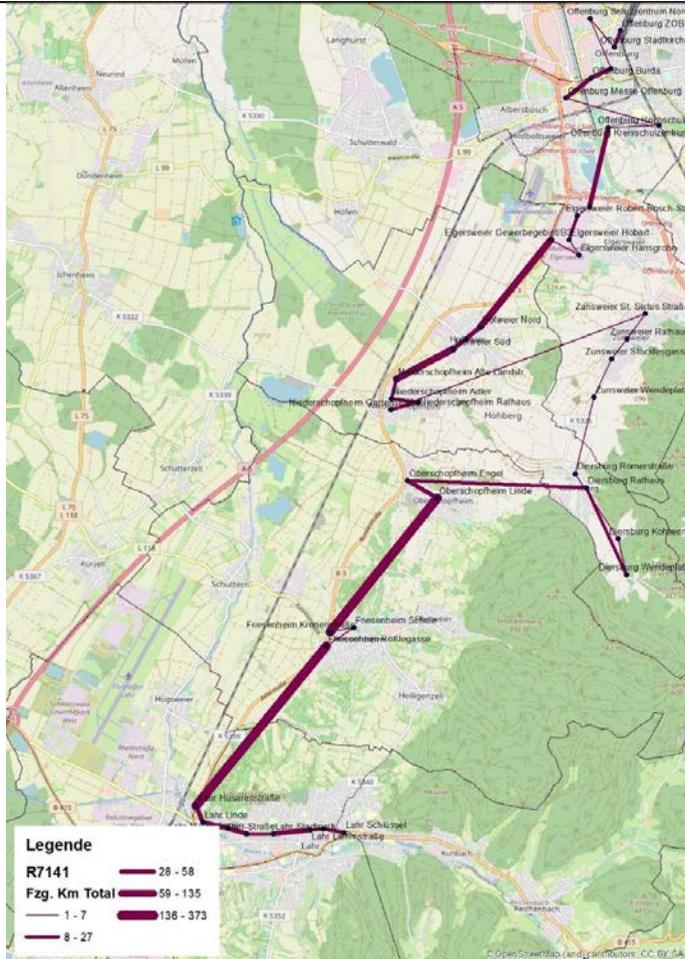


Linie 7135/37: Offenburg - Appenweier - Urloffen

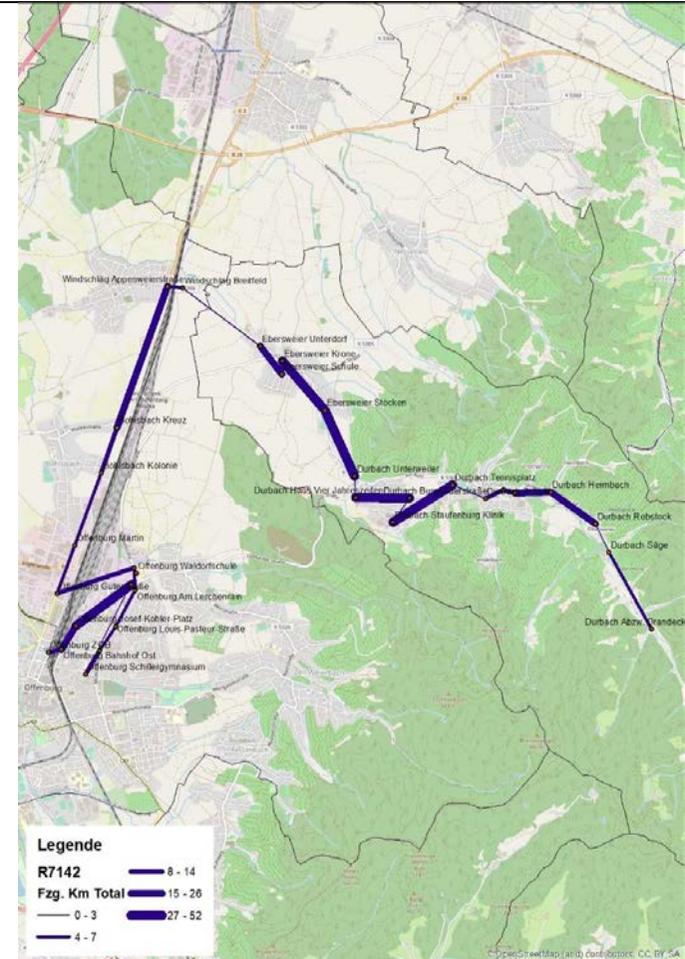
Linie 7136/46/56: Offenburg - Sand - Willstätt - Eckartsweier / Kork



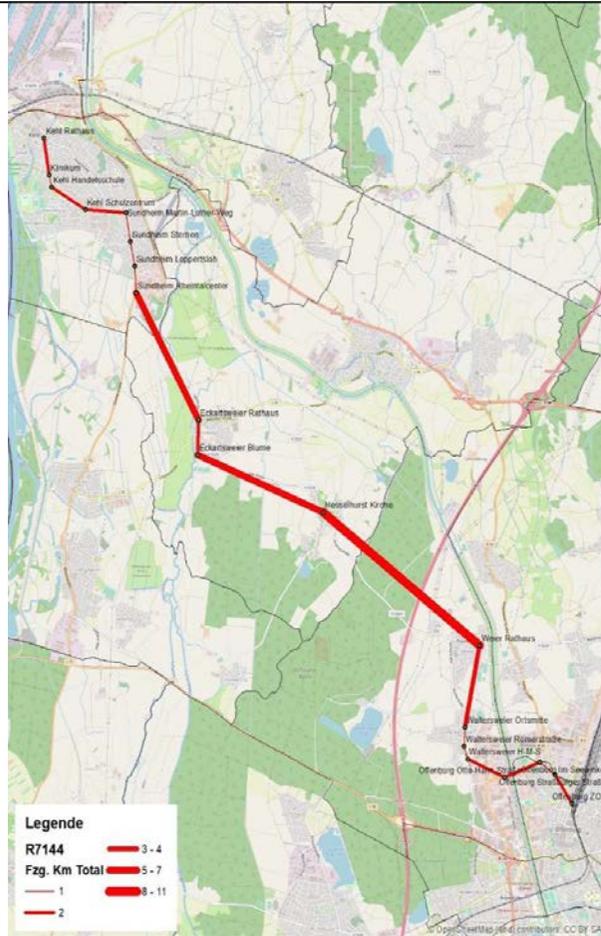
Linie 714: Offenburg - Niederschopfheim - Lahr



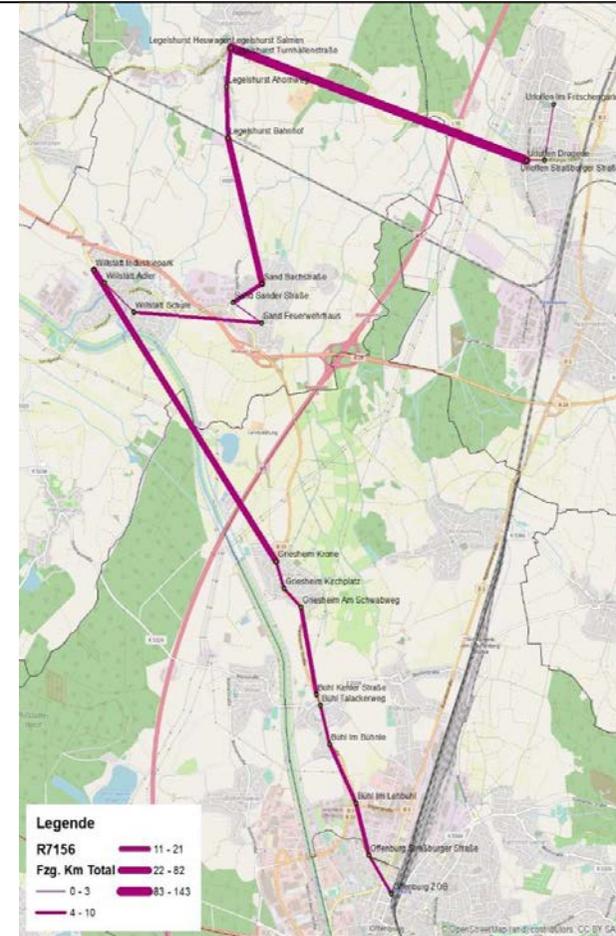
Linie 7142: Durbach - Ebersweier - Offenburg



Linie 7144: Offenburg - Weier - Hesselhurst - Kehl



Linie 7156: Offenburg - Sand - Legelshurst - Urloffen



A.2 Akzeptanz Umfrage: Charakterisierung der Stichprobe

	Anzahl	Anteil (%)
Alter		
Jünger als 18 Jahre	0	0%
18 bis 24 Jahre	18	12%
25 und 34 Jahre	28	19%
35 und 44 Jahre	26	17%
45 und 54 Jahre	19	13%
55 und 64 Jahre	29	19%
65 Jahre und älter	30	20%
Geschlecht		
Weiblich	74	49%
Männlich	76	51%
Anzahl Anteil (%)		
Raumtyp		
Gemeinde mit <5T Einwohnern	65	43%
Gemeinde mit 5T-20T Einwohnern	39	26%
Stadt mit 20T – 100T Einwohnern	13	9%
Vorort einer Stadt mit 20T – 100T Einwohnern	32	21%
Stadt mit 100T – 500T Einwohnern	1	0.7%

A.3 Litteraturverzeichnis AP1

Alessandrini, Adriano (2016): Final publishable summary report. Online verfügbar unter <http://cordis.europa.eu/docs/results/314/314190/final1-final-publishable-report.pdf>.

Fishbein, Martin; Ajzen, Icek (1975): Belief, Attitude, Intention and Behavior: An Introduction to Theory and Research. In: Addison-Wesley, Reading, MA.

Kim, S. S.; Malhotra, N. K.; Narasimhan, S. (2005): Two Competing Perspectives on Automatic Use: A Theoretical and Empirical Comparison. In: Information Systems Research, S. 418-432.

Venkatesh, Viswanath; Morris, Michael G.; Davis, Gordon B.; Davis, Fred D. (2003): User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. In: MIS Quarterly (27), S. 425-478.

Venkatesh, Viswanath; Thong, James; Xu, Xin (2012): Consumer Acceptance and Use of Information Technology: Extending the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology. In: MIS Quarterly (Vol. 36, No.1), S. 157-178.

Kroesen, Maarten; Handy, Susan; Chorus, Caspar (2017): Do attitudes cause behavior or vice versa? An alternative conceptualization of the attitude-behavior relationship in travel behavior modeling. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice (101), S. 190- 202. DOI: 10.1016/j.tra.2017.05.013.

Lucke, Doris (1995): Akzeptanz. Legimität in der "Abstimmungsgesellschaft". Opladen: Leske + Budrich.

Madigan, Ruth; Louw, Tyron; Dziennus, Marc; Graindorge, Tatiana; Ortega, Erik; Graindorge, Matthieu; Merat, Natasha (2016): Acceptance of Automated Road Transport Systems (ARTS): An Adaptation of the UTAUT Model. In: Transportation Research Procedia. Osswald, Sebastian; Wurhofer, Daniela; Trösterer, Sandra; Beck, Elke (Hg.) (2012): Predicting information technology usage in the car: towards a car technology acceptance model.

A.4 Batterieelektrische Umsetzung

A.4.1 12m E-Bus Kosten Literaturübersicht

Wert	Einheit	Jahr	Kommentar	Referenz
247.863	€	2018	-	Lucien Mathieu 2018 Electric buses arrive on time, Transport & Environment, 30p
267.500	€	2015	215.000-320.000 €	Mikko Pihlatie 2015 Fully electric city buses – the viable option, 9p
420.000	€	2016	12m Standard-Bus	Alexander Kunith 2016 Electrification of a city bus network - An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast charging electric bus systems, DIW Berlin, p.8
300.000	€	2018	Solaris Bus & Coach S.A	Fabian Meishner 2018 Introduction of Battery Electric Buses in European Cities – Economic Comparison of Novel Technological Concepts, 6p
280.000	€	2018	Bozankaya/Sileo GmbH	Fabian Meishner 2018 Introduction of Battery Electric Buses in European Cities – Economic Comparison of Novel Technological Concepts. Table VII, pg. 5
374.246	€	2017	320.000 £/bus, 1£=1,17€	Element Energy 2017 Perspectives on the last year in hydrogen mobility, 14p
475.423	€	2016	Übernachtladung	Moataz Mahmoud 2016 Electric buses-A review of alternative powertrains. Table 2, pg. 7
427.075	€	2016	Opportunity-Ladung	Moataz Mahmoud 2016 Electric buses-A review of alternative powertrains. Table 2, pg. 7
305.380	€	2014	Übernachtladung, Daten vom schwedischen Hersteller	Lisiana Nurhadi 2014 A sensitivity analysis of total cost of ownership for electric public bus transport systems in Swedish medium sized cities. Table 1, pg. 822
316.485	€	2014	Opportunity-Ladung, Daten vom schwedischen Hersteller	Lisiana Nurhadi 2014 A sensitivity analysis of total cost of ownership for electric public bus transport systems in Swedish medium sized cities. Table 1, pg. 822
270.000	€	2014	-	Rendimiento Real de Buses, Pg. 35

247.863	€	2018	-	"Electric bus arrive on time" Marketplace, economic, technology, environmental and policy perspectives for fully electric buses in the EU. Pg 31
350.000	€	2018	-	Vepsaelaeinen, Jari 2018. Cost-Benefit Analysis of electric bus fleet with various operation intervals. Table II, pg. 1524
235.000	€	2017	BYD K9 12m Bus	Guang Wang 2018. Charge Data-Driven Real time charging scheduling for large-scale electric bus fleets, pg. 1

A.4.2 18m E-Bus Kosten Literaturübersicht

Wert	Einheit	Jahr	Kommentar	Referenz
500.000	€	2016	-	Alexander K. 2016, DIW Berlin, p.8
589.000	€	2018	Opportunity-Ladung, von Slovakia	https://www.electrive.com/2018/01/29/bratislava-receives-first-electric-buses-sor/
680.000	€	2018	Ikarus Skoda	Fabian Meishner 2018 Introduction of Battery Electric Buses in European Cities , 8p
532.000	€	2018	Solaris Bus & Coach S.A	Fabian Meishner 2018 Introduction of Battery Electric Buses in European Cities. Table V, pg. 3.

A.4.3 E-Bus Kosten inklusive Batteriekosten

Wert	Einheit	Jahr	Kommentar	Referenz
630.000	€	2018	350 kWh e-bus, 700000\$	BNEF (2018) Electric Buses in Cities, 34p
513.000	€	2018	250 kWh e-bus, 570000\$	BNEF (2018) Electric Buses in Cities, 34p
477.000	€	2018	110 kWh e-bus, 530000\$	BNEF (2018) Electric Buses in Cities, 34p
577.777	€	2018	SOR-NS-12-electric	Marek P. 2018 4 p
680.000	€	2016	Proterra, 750000\$	Cost Model Discussion with ACT Cost Subgroup, slide 9 and 10
577.294	€	2013	595000 - 680000\$	Source: Frost & Sullivan (2013)
450.000	€	2015	12 m bus with 62.6 kWh battery capacity, opportunity charging	Lajunen A, 2015. Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel,natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses

562.500	€	2015	12 m bus with 333.6 kWh battery capacity, overnight charging	Lajunen A, 2015. Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses
430.000	€	2015	Chinese bus (Granton/Teewo) adapted to European market by German Company Eurabus. 240 kWh battery, slow depot 40 kW	Jens Plambeck, 2015. Information om genomförd behovsanalys av övergång till eldriven busstrafik, pg. 24
500.000	€	2015	Hybricon 12 m bus with heavy insulation for winter climate in Sweden	Jens Plambeck, 2015. Information om genomförd behovsanalys av övergång till eldriven busstrafik, pg. 24
517.000	€	2015	12 m BEB with opportunity charging. 220 kWh battery. Anonymous wo compromise prices	Sebastian Hoerold, 2015. Städteübergreifendes Konzept für elektrisch angetriebene Busse in Theringer Mittelstaedten. Tabelle 23, pg 59
537.000	€	2015	12 m BEB with opportunity charging. 220 kWh battery. Anonymous wo compromise prices	Sebastian Hoerold, 2015. Städteübergreifendes Konzept für elektrisch angetriebene Busse in Theringer Mittelstaedten. Tabelle 23, pg 59
450.000	€	2015	12 m BEB with opportunity charging. 220 kWh battery. Anonymous wo compromise prices	Sebastian Hoerold, 2015. Städteübergreifendes Konzept für elektrisch angetriebene Busse in Theringer Mittelstaedten. Tabelle 23, pg 59
475.423	€	2016	Übernachtladung	Moataz Mahmoud 2016 Electric buses-A review of alternative powertrains. Table 2, pg. 7
427.075	€	2016	Opportunity-Ladung	Moataz Mahmoud 2016 Electric buses-A review of alternative powertrains. Table 2, pg. 7

A.4.4 E-Bus lifetime in literature reviews

Wert	Einheit	Jahr	Kommentar	Referenz
15	Jahr	2018	-	BNEF (2018) Electric Buses in Cities
14	Jahr	2017	-	Element Energy 2017 Perspectives on the last year in hydrogen mobility, 14p
12	Jahr	2018	-	H. Ammermann 2015 A Study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Roland Berger GmbH
12	Jahr	2018	Betriebsstunden pro Jahr: 4000 h/Jahr	Vepsaelaeinen, Jari 2018. Cost-Benefit Analysis of electric bus fleet with various operation intervals. Table I, pg. 1524
10	Jahr	2018		Marek P. 2018 4 p
10	Jahr	2015		Oscar Olsson (2016) Method to analyze cost effectiveness of different electric bus systems. Table 4, pg. 9
10	Jahr	2014	12-Meter-Bus, Übernachtladung. Daten vom schwedischen Hersteller	Lisiana Nurhadi 2014 A sensitivity analysis of total cost of ownership for electric public bus transport systems in Swedish medium sized cities. Table 1, pg. 822
10	Jahr	2018	Abschreibung: 25%/Jahr für Fahrzeuge und 35%/Jahr für Batterien	IEA EV Outlook (2018) , pg. 71

A.4.5 Batterie-kosten 2008-2018

Wert	Einheit	Jahr	Kommentar	Referenz
1.206	€/kWh	2008	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018. Assessing the progress toward lower priced long range battery electric vehicles, pg 148, fig 2.
504	€/kWh	2008		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
1.125	€/kWh	2009		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
630	€/kWh	2009	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
612	€/kWh	2009		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
1.044	€/kWh	2010		BNEF 2019, https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/
981	€/kWh	2010		"WSJ: Nissan Leaf profitable by year three; battery cost closer to \$18,000". green.autoblog.com.
1.260	€/kWh	2010		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.

1.152	€/kWh	2010		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
990	€/kWh	2010		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
855	€/kWh	2010		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
792	€/kWh	2010		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
729	€/kWh	2010		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
648	€/kWh	2010	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
603	€/kWh	2010		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
540	€/kWh	2010		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
369	€/kWh	2010	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
189	€/kWh	2010	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
809	€/kWh	2011		<u>BNEF, 2019</u>
792	€/kWh	2011		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
522	€/kWh	2011		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
360	€/kWh	2011	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
288	€/kWh	2011	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
636	€/kWh	2012		BNEF, 2019
833	€/kWh	2012		"McKinsey: Lithium Ion Battery Prices to Reach \$200 Per kWh by 2020 PluginCars.com"
889	€/kWh	2012		"McKinsey: Lithium Ion Battery Prices to Reach \$200 Per kWh by 2020 PluginCars.com"
739	€/kWh	2012	520-650 \$/kWh	"McKinsey: Lithium Ion Battery Prices to Reach \$200 Per kWh by 2020 PluginCars.com"
572	€/kWh	2012		"Lithium-ion battery costs will still be about \$400/kWh by 2020". green.autoblog.com.
707	€/kWh	2012	500-600 \$/kWh	"Battery technology charges ahead McKinsey & Company". mckinsey.com.
1.026	€/kWh	2012		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
945	€/kWh	2012		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
738	€/kWh	2012		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
693	€/kWh	2012		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
549	€/kWh	2012	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
459	€/kWh	2012	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
423	€/kWh	2012		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
234	€/kWh	2012	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
585	€/kWh	2013		BNEF, 2019
994	€/kWh	2013	800-1000 \$/kWh	"Tesla Debacle Highlights Need For New EV Battery Technology - Forbes". forbes.com.

648	€/kWh	2013		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
549	€/kWh	2013		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
522	€/kWh	2013		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
459	€/kWh	2013		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
360	€/kWh	2013	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
288	€/kWh	2013	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
270	€/kWh	2013		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
252	€/kWh	2013	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
257	€/kWh	2013		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 26
519	€/kWh	2014		BNEF, 2019
392	€/kWh	2014	200-300 \$/kWh	"Tesla to Miss 2020 Delivery Target by 40%, Analyst Forecasts". greentechmedia.com. Tesla's current batteries cost \$200-\$300 per kilowatt hour.
450	€/kWh	2014		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
315	€/kWh	2014	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
279	€/kWh	2014	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
225	€/kWh	2014	Market leaders	Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
452	€/kWh	2014		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 22
336	€/kWh	2015		BNEF, 2019
750	€/kWh	2015	High power battery cost	Lajunen A, 2015. Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel,natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses
500	€/kWh	2015	High energy battery cost	Lajunen A, 2015. Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel,natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses
585	€/kWh	2015		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
459	€/kWh	2015		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
374	€/kWh	2015		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
315	€/kWh	2015		Bjoern Nykvist, 2018, pg 148, fig 2.
333	€/kWh	2015		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 11
225	€/kWh	2015		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 12
322	€/kWh	2015		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 13
459	€/kWh	2015		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 14
207	€/kWh	2015		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 15
315	€/kWh	2015		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 17
277	€/kWh	2015		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 18
242	€/kWh	2015		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 19

249	€/kWh	2015		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 21
244	€/kWh	2015		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 23
337	€/kWh	2015		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 24
587	€/kWh	2015		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 25
225	€/kWh	2015		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 28
234	€/kWh	2015		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 31
225	€/kWh	2015		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 34
259	€/kWh	2016		BNEF, 2019
187	€/kWh	2016		Dalløkken, Per Erlien (2016-12-23). "Her produseres elbilen og bensinbilen på samme linje"[Electric car and petrol truck produced on the same line]. Teknisk Ukeblad (in Norwegian). Norway
201	€/kWh	2016		Cobb, Jeff (2015-10-02). "Chevy Bolt Production Confirmed For 2016". Hybrid cars
270	€/kWh	2016		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 16
204	€/kWh	2016		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 20
171	€/kWh	2016		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 30
180	€/kWh	2016		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 33
193	€/kWh	2017		BNEF, 2019
247	€/kWh	2017		IEA EV Outlook 2018, 64p
190	€/kWh	2017		BNEF, 2019
197	€/kWh	2017	for large batteries produced in large volumes	IEA EV Outlook 2018, 64p
210	€/kWh	2017		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 27
182	€/kWh	2017		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 29
194	€/kWh	2017		Nykvst B, 2018. Appendix. Pgs. 9 - 32
158	€/kWh	2018		BNEF, 2019

A.4.6 Depot charging station cost in literature review

Wert	Einheit	Jahr	Kommentar	Referenz
44551	€	2018	bus-to-charger ratio 2:1	BNEF (2018) Electric Buses in Cities. Table 8, pg. 34
20000	€	2015	Large battery, depot charging 50 kW	Mikko Pihlatie 2015 Fully electric city buses – The viable option, slide 9
16000	€	2018	per unit, Installation costs depot: 1000 €	Fabian Meishner 2018 Introduction of Battery Electric Buses in European Cities, 6p

8328,5	€	2014	Swedish manufacturer 2.5 -4 h full charge	Lisiana Nurhadi 2014 A sensitivity analysis of total cost of ownership for electric public bus transport systems in Swedish medium sized cities. Table 1, pg. 822
50000	€	2018	2 buses	Cost Model Discussion with ACT Cost Subgroup, pg. 24 Table "Infrastructure Costs"
50000	€	2017	Hardware costs for 2 charging points from 50 - 150 kW.	Simon Funke, 2018. Techno-oekonomische Gesamtbewertung heterogener Massnahmen zur Verlaengerung der Tagesreichweite von batterieelektrischen Fahrzeugen. Pg. 32
46500	€	2020	100 kW power charging station. Total investment and installation cost. Assumptions of Gnann Till	Gnann Till, 2018. Fast charging infrastructure for electric vehicles. Today's and future needs. Table 5, pg. 321.
20000	€	2014	50 kW power, 1 DC charging point 7.5 year depreciation period. Hardware costs	Hildebrandt, J. 2016. Bereitstellung von Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung idealtypischer Ladebedarfe. Tabelle 3, pg 44
90000	€	2012	50 kW power charging station. Total investment and installation cost based on Schroeder and Traber 2012	Gnann Till, 2018. Fast charging infrastructure for electric vehicles. Today's and future needs. Table 5, pg. 321.
35000	€	2015	50 kW power charging station. Total investment and installation cost based on NPE 2015	Gnann Till, 2018. Fast charging infrastructure for electric vehicles. Today's and future needs. Table 5, pg. 321.

A4.7 Pantograph charging station cost in literature review

Wert	Einheit	Jahr	Kommentar	Referenz
320000	€	2016	Fast-charging components and civil works. 300 kW	Alexander Kunith 2016. Electrification of a city bus network, DIW Berlin. Pg. 8
250000	€	2015	Small battery, opportunity charging. 300 kW	Mikko Pihlatie 2015 Fully electric city buses – The viable option, slide 9
259310	€	2014	Swedish manufacturer 10 min. full charge	Lisiana Nurhadi 2014 A sensitivity analysis of total cost of ownership for electric public bus transport systems in Swedish medium sized cities. Table 1, pg. 822

350000	€	2018	Probably referring to fast terminal charging station due to model description	Vepsaelaeinen, Jari 2018. Cost-Benefit Analysis of electric bus fleet with various operation intervals. Table II, pg. 1524
349000	€	2018	6 buses	Cost Model Discussion with ACT Cost Subgroup, pg. 24 Table "Infrastructure Costs"
204935	€	2018	bus-to-charger ratio 20:1	BNEF (2018) Electric Buses in Cities. Table 8, pg. 34
254356	€	2018	Siemens, 450 kW	Assessing the Construction of Charging Stations for Electric Buses- A Case Study for Stockholm Inner City,pg 95 Table 20
207253	€	2018	Bombardier, 450 kW	Assessing the Construction of Charging Stations for Electric Buses- A Case Study for Stockholm Inner City,pg 95 Table 20

A4.8 Strompreis⁹

Jahr	Beschaffung, Netzentgelt, Vertrieb	Konzessions abgabe	EEG- Umlage	KWKG- Umlage	§19 StromNEV- Umlage	Offshore- Netzumlage	Umlage für abschaltbar e Lasten	Strom steuer	Sum
1998	9,15	0,11	0,08					0	9,34
1999	8,51	0,11	0,09					0,15	8,86
2000	5,46	0,11	0,2	0,13				0,26	6,16
2001	5,61	0,11	0,25	0,19				0,31	6,47
2002	5,99	0,11	0,35	0,05				0,36	6,86
2003	6,17	0,11	0,42	0,05				1,23	7,98
2004	7,02	0,11	0,51	0,05				1,23	8,92
2005	7,65	0,11	0,69	0,05				1,23	9,73
2006	9,26	0,11	0,88	0,05				1,23	11,53
2007	9	0,11	1,02	0,05				1,23	11,41
2008	10,7	0,11	1,16	0,05				1,23	13,25
2009	8,7	0,11	1,31	0,05				1,23	11,40
2010	8,63	0,11	2,05	0,05				1,23	12,07
2011	8,83	0,11	3,53	0,03				1,537	14,04
2012	8,98	0,11	3,592	0,04	0,07			1,537	14,33
2013	7,85	0,11	5,277	0,07	0,1	0,17		1,537	15,11
2014	6,95	0,11	6,24	0,07	0,23	0,17	0,009	1,537	15,32
2015	7,19	0,11	6,17	0,08	0,15	-0,01	0,006	1,537	15,23
2016	7	0,11	6,354	0,28	0,24	0,03		1,537	15,55
2017	8,02	0,11	6,88	0,29	0,25	-0,002	0,006	1,537	17,09
2018	8,97	0,11	6,792	0,26	0,24	0,04	0,011	1,537	17,96

⁹ BDEW Strompreisanalyse Januar 2019 / Markus Haller 2015 Projected EEG Costs up to 2035 Agora Energiewende, 18page

2019	10,05	0,11	6,405	0,28	0,2	0,416	0,005	1,537	19,00
2020	10	0,11	7,4	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	19,63
2021	10	0,11	7,5	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	19,73
2022	10	0,11	7,6	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	19,83
2023	10	0,11	7,6	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	19,83
2024	10	0,11	7,4	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	19,63
2025	10	0,11	7,2	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	19,43
2026	10	0,11	6,8	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	19,03
2027	10	0,11	6,7	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	18,93
2028	10	0,11	6,5	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	18,73
2029	10	0,11	6,4	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	18,63
2030	10	0,11	6	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	18,23
2031	10	0,11	5,5	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	17,73
2032	10	0,11	4,9	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	17,13
2033	10	0,11	4,5	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	16,73
2034	10	0,11	4,4	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	16,63
2035	10	0,11	4,4	0,28	0,2	0,1	0,005	1,537	16,63