

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME, ISE

- FRHYBUS - POTENZIAL VON WASSERSTOFF- BRENNSTOFFZELLEN-BUSSEN IM ÖPNV IM GROSSRAUM FREIBURG

Abschlussbericht

Öffentliche Version

- Revision 0 -

dieses Projekt wurde gefördert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg im Förderprogramm BWPLUS

- FRHYBUS - POTENZIAL VON WASSERSTOFF- BRENNSTOFFZELLENBUSSEN IM ÖPNV IM GROSSRAUM FREIBURG

Abschlussbericht

Öffentliche Version

- Revision 0 -

Nikolas Knetsch
Marius Holst
Amelie Schatz
Christopher Voglstätter

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
in Freiburg

Projektnummer: BWÖPN 18001
Projektlaufzeit: 01.12.2018 – 30.11.2019
Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
Assoziierte Projektpartner: Stadt Freiburg, Freiburger Verkehrs-AG, SBG Südbadenbus GmbH

Inhalt

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einführung..... | 6 |
| 1.1 | Einleitung und Motivation..... | 6 |
| 1.2 | Vorstellung der beteiligten (assoziierten) Partner..... | 7 |
| 1.2.1 | Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme – Abteilung Chemische Energiespeicherung..... | 7 |
| 1.2.2 | Stadt Freiburg..... | 7 |
| 1.2.3 | SBG Südbadenbus GmbH..... | 8 |
| 1.2.4 | Freiburger Verkehrs-AG (VAG)..... | 8 |
| 2 | Erhebung der Fahrzeugspezifikationen alternativer Antriebe (AP1)..... | 10 |
| 2.1 | Omnibusse mit Dieselantrieb..... | 10 |
| 2.2 | Omnibusse mit Batterieantrieb..... | 11 |
| 2.2.1 | Depotladung..... | 12 |
| 2.2.2 | Gelegenheitsladung mittels Pantograph..... | 15 |
| 2.3 | Omnibusse mit Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb..... | 17 |
| 2.3.1 | Brennstoffzellenbusse (BZ)..... | 17 |
| 2.3.2 | Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-REX)..... | 19 |
| 2.4 | Kostenrechnung..... | 20 |
| 2.4.1 | Grundlagen der Berechnung der Total Cost of Ownership..... | 20 |
| 2.4.2 | TCO von Busantriebstechnologien in der Literatur..... | 22 |
| 3 | Erhebung der Busstrecken /-umläufe im geplanten Einzugsgebiet (AP2) ... | 24 |
| 3.1 | Betrachtungsraum..... | 24 |
| 3.2 | Datenerhebung..... | 25 |
| 3.3 | Benötigte KPI sowie Annahmen und Randbedingungen..... | 26 |
| 3.4 | Berechnung der Rest-Reichweite..... | 26 |
| 3.5 | Überführung in ArcGIS Pro und Verwendung des Python-Skripts..... | 27 |
| 3.5.1 | Streckenerhebung mit ArcGIS Pro..... | 27 |
| 3.5.2 | Bewertung der Umläufe mit Hilfe von Python..... | 29 |
| 4 | Erhebung der Situation / Daten an den relevanten Betriebshöfen (AP3).... | 30 |
| 4.1 | Freiburger Verkehrs-AG (VAG)..... | 30 |
| 4.1.1 | Ist-Zustand..... | 30 |
| 4.1.2 | Mögliche Anpassungen für den Einsatz von H ₂ -Bussen..... | 32 |
| 4.1.3 | Geplante Anpassungen für den Einsatz von Batteriebussen..... | 32 |
| 4.2 | Südbadenbus GmbH (SBG)..... | 33 |
| 4.2.1 | Ist-Zustand..... | 33 |
| 4.2.2 | Mögliche Anpassungen für den Einsatz von H ₂ -Bussen..... | 35 |
| 5 | Erhebung weiterer relevanter Randbedingungen (AP4)..... | 36 |
| 5.1 | Anforderungen, Hemmnisse und Vorteile für die Einführung neuer Antriebstechnologien im ÖPNV..... | 36 |
| 5.2 | Nutzung von Synergieeffekte zwischen Wasserstoffbussen und anderen Technologien..... | 39 |
| 5.3 | Akzeptanz von Wasserstoff im ÖPNV..... | 40 |
| 5.4 | Zwischenfazit zu sonstigen Randbedingungen..... | 41 |
| 6 | Synthese: Erhebung des Potenzials für Wasserstoff im ÖPNV im Großraum Freiburg (AP5)..... | 42 |
| 6.1 | Randbedingungen und Annahmen..... | 43 |
| 6.2 | Ergebnisse der GIS-Analyse und Python-Berechnung (AP2)..... | 45 |
| 6.2.1 | VAG..... | 47 |
| 6.2.2 | SBG..... | 52 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.3 | Zwischenfazit zur Potenzialerhebung | 56 |
| 7 | Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)..... | 57 |
| 7.1 | Konzepterstellung | 57 |
| 7.1.1 | Erste Ausbaustufe – Konzept 0 | 58 |
| 7.1.2 | Finale Ausbaustufe..... | 59 |
| 7.1.2.1 | Konzept 1.1.1 – VAG + SBG..... | 60 |
| 7.1.2.2 | Konzept 1.1.2 – VAG + SBG..... | 61 |
| 7.1.2.3 | Konzept 1.2.1 – VAG + SBG..... | 62 |
| 7.1.2.4 | Konzept 1.2.2 – VAG + SBG..... | 64 |
| 7.1.2.5 | Konzept 2.1 - VAG..... | 65 |
| 7.1.2.6 | Konzept 2.2 - SBG..... | 66 |
| 7.1.2.7 | Konzept 3.1 - VAG..... | 67 |
| 7.1.2.8 | Konzept 3.2 - SBG..... | 68 |
| 7.1.2.9 | Konzept 4.1 - VAG..... | 69 |
| 7.1.2.10 | Konzept 4.2 - SBG..... | 70 |
| 7.2 | Methodische Herangehensweise / KPI | 71 |
| 7.3 | Simulation..... | 72 |
| 7.3.1 | Aufbau des Simulationsmodells..... | 72 |
| 7.3.2 | Annahmen und Randbedingungen | 72 |
| 7.3.2.1 | Technische Simulation | 72 |
| 7.3.2.2 | Ökonomie - Berechnung LCOHy und TCO..... | 76 |
| 7.3.3 | Eingangszeitreihen | 78 |
| 7.4 | Ergebnisse..... | 79 |
| 7.4.1 | Erste Ausbaustufe | 80 |
| 7.4.2 | Finale Ausbaustufe..... | 83 |
| 7.4.2.1 | Wasserstofftankstelle der VAG | 83 |
| 7.4.2.2 | Wasserstofftankstelle der SBG | 87 |
| 7.4.2.3 | Konzept 1.1.1 – VAG + SBG..... | 92 |
| 7.4.2.4 | Konzept 1.1.2 – VAG + SBG..... | 96 |
| 7.4.2.5 | Konzept 2.1 – VAG | 101 |
| 7.4.2.6 | Konzept 2.2 – SBG | 105 |
| 7.4.2.7 | Konzept 3.1 – VAG | 110 |
| 7.4.2.8 | Konzept 3.2 – SBG | 112 |
| 7.4.2.9 | Konzept 4.1 – VAG | 114 |
| 7.4.2.10 | Konzept 4.2 – SBG | 116 |
| 7.5 | Zwischenfazit Konzeptbewertung | 118 |
| 8 | Zusammenfassung und Handlungsempfehlung | 120 |
| 9 | Quellenangaben..... | 124 |

1.1 Einleitung und Motivation

Durch die aktuelle Diskussion über die Luftverschmutzung in Großstädten, insbesondere durch den Ausstoß von Stickstoffdioxid durch Dieselfahrzeuge, wächst auch bei kommunalen Betreibern des öffentlichen Personennahverkehrs das Bewusstsein für eine umweltfreundliche und lokal emissionsfreie Mobilität.

Im Projekt FrHyBus werden deshalb im Großraum Freiburg die vorhandenen und künftigen Busstrecken des ÖPNV hinsichtlich ihres Potenzials für eine (teilweise) Umrüstung auf Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb analysiert. Weiteres Ziel ist die Erstellung eines Konzepts für eine (teilweise) Umrüstung von Diesel- auf Brennstoffzellen-Busse inklusive eines ersten sinnvollen Erprobungsschrittes und inklusive eines Konzeptes für die Wasserstoff-Versorgung.

Das Fraunhofer ISE erhebt dazu gemeinsam mit den relevanten Busbetreibern der Region (als assoziierte Partner eingebunden) Informationen zu vorhandenen und künftigen Buslinien (Länge, Steigung, Fahrtdauer, Haltestellen, etc.) und ermittelt auf dieser Basis das Potenzial für eine mögliche Einführung eines wasserstoffbasierten Busverkehrs im Großraum Freiburg. Für dieses Potenzial wird anschließend ein Konzept zur vollständigen Realisierung ausgearbeitet. Davon abgeleitet wird ein Konzept zur Realisierung einer ersten Ausbaustufe inkl. Wasserstoffversorgung / -erzeugung, aus der nachgelagert die weitere Entwicklung hervorgehen kann.

Aufgrund der grundsätzlichen Aufgeschlossenheit der Bürgerinnen und Bürger in und um Freiburg in Bezug auf klimafreundliche Lösungen im öffentlichen Raum und die Vorreiterrolle der Stadt in der Reduzierung des motorisierten Individualverkehrs, eignet sich besonders der Großraum Freiburg für eine Betrachtung des Potenzials von Bussen mit Wasserstoffantrieb. Die geografische Lage an der Grenze zwischen Rheinebene und Schwarzwald und die damit einhergehende vielseitige Topografie sowie die enge Nachbarschaft von Großstadt und ländlich geprägter Bebauungsstruktur bringen ein Zusammenspiel von Stadt-, Überland- und Bergstrecken und bieten damit eine Chance für den breiten Einsatz von Wasserstoff in Bussen.

Dieses vielseitige Einsatzgebiet kann auch für in Baden-Württemberg ansässigen Hersteller von Bussen eine wertvolle Möglichkeit und Plattform für die Erprobung und Validierung von Wasserstoff-Bussen im Feld unter vielseitigen Randbedingungen bieten!

1.2 Vorstellung der beteiligten (assoziierten) Partner

1.2.1 Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme – Abteilung Chemische Energiespeicherung

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE gehört als größtes Solarforschungsinstitut in Europa seit 30 Jahren zu den führenden FuE-Dienstleistern für solargestützte Energienutzung.

In den für diese Studie relevanten Fachgebieten Wasserstoff-Mobilität und Wasserstoff-Infrastruktur ist das Fraunhofer ISE seit vielen Jahren tätig. Der Arbeitsschwerpunkt liegt dabei einerseits auf der Konzeption und theoretischen Erstellung von Wasserstoff-Erzeugungs- und Infrastrukturanlagen. Dies wird seit 2012 in unterschiedlichen öffentlich geförderten Forschungsprojekten, z.B. den Projekten WESpe (Aufgabe ISE: techno-ökonomische Bewertung von Wind-Wasserstoff-Systemen), Leuchtturmprojekt Power-to-Gas Baden-Württemberg (Betrachtung der Wärmeauskoppelung von Power-to-Hydrogen-Anlagen), Direkte solare Wasserstoffherzeugung (techno-ökonomische Konzeptentwicklung einer direkten PV-Wasserstoffanlage), Energieverbund Freiburg (Aufbau, Betrieb und Einsatz einer Wasserstoff-Einspeiseanlage im kommunalen Verteilnetz), Kopernikus-LOHC (Cluster FC-B1 – Konzeption einer Wasserstoff-Tankstelle mit LOHC als Wasserstoff-Quelle), sowie einer erheblichen Anzahl Industriedirektaufträge durchgeführt.

Darüber hinaus betreibt das Fraunhofer ISE am Institutsstandort in Freiburg seit März 2012 eine Wasserstofftankstelle mit onsite-Elektrolyse, welche bis heute als Forschungsplattform und öffentliche H₂-Tankstelle dient sowie bis zu drei Brennstoffzellen-Fahrzeuge. Seit August 2017 wird in einer weiteren Anlage die Einspeisung von Wasserstoff in das Erdgasnetz erprobt. Durch entsprechende Forschungsprojekte in diesen Bereichen (bspw. Projekt „Halma“ – Demonstrationsbetrieb eines durch einen Partner entwickelten Wasserstoff-Qualitätssensors) besteht ein reger Austausch mit den Akteuren der Wasserstoff-Mobilität.

1.2.2 Stadt Freiburg

Die Stadt Freiburg ist die größte Stadt Südbadens und bildet den Mittelpunkt des Großraums Freiburg. Mit ihrem zentral am Hauptbahnhof gelegenen Omnibusbahnhof ist sie der Drehpunkt für den innerstädtischen und regionalen Busnahverkehr im Großraum Freiburg.

Die Stadt Freiburg hat entsprechend ihres internationalen Rufs als „Green City“ klare und öffentlich bekannte Klimaziele. Die CO₂-Emissionen sollen bis zum Jahr 2030 auf 50% reduziert werden. In allen Sektoren soll sogar bis zum Jahr 2050 vollständige Klimaneutralität erreicht sein. Eine wichtige und zentrale Säule der Klimaschutzstrategie ist die seit Jahren auf Stadtverträglichkeit ausgerichtete Verkehrspolitik.

Neben dem schienenengebundenen ÖPNV stellen Omnibusse eine wichtige Alternative zum privaten PKW in Freiburg dar und werden diese Stellung auch behalten – v.a. aufgrund ihrer Erschließung der Fläche und der Andienungsfunktion an die Stadtbahn und den SPNV in der Stadt Freiburg und der Region.

Im Rahmen des städtischen Klimaschutzkonzeptes sowie den Überlegungen zur Luftreinhaltung in Freiburg gibt es konkrete Planungen, von fossiler Verbrennungsenergie unabhängige Busse anzuschaffen. Vor dem Hintergrund der vielfältigen Fahrprofile und der punktuellen Überschreitung von Stickoxid-Grenzwerten in der Stadt werden Wasserstoff-Busse im ÖPNV als möglicher Baustein des zukünftigen ÖPNV-Angebotes gesehen.

1.2.3 SBG Südbadenbus GmbH

Einführung

Die 1989 gegründete Südbadenbus mit Sitz in Karlsruhe ist eine Tochter der DB Regio und bedient mit ihren Omnibussen den Nahverkehr im Südwesten Baden-Württembergs zwischen Schramberg, Radolfzell und dem Rhein.

Das Unternehmen beschäftigt rund 600 Mitarbeiter und betreibt zusammen mit Partnerunternehmen rund 143 Buslinien mit 247 Bussen (Stand 2016). Jährlich werden rund 39 Mio. Fahrgäste transportiert, wobei die Busse etwa 32 Mio. Kilometer zurücklegen (Stand 2009).

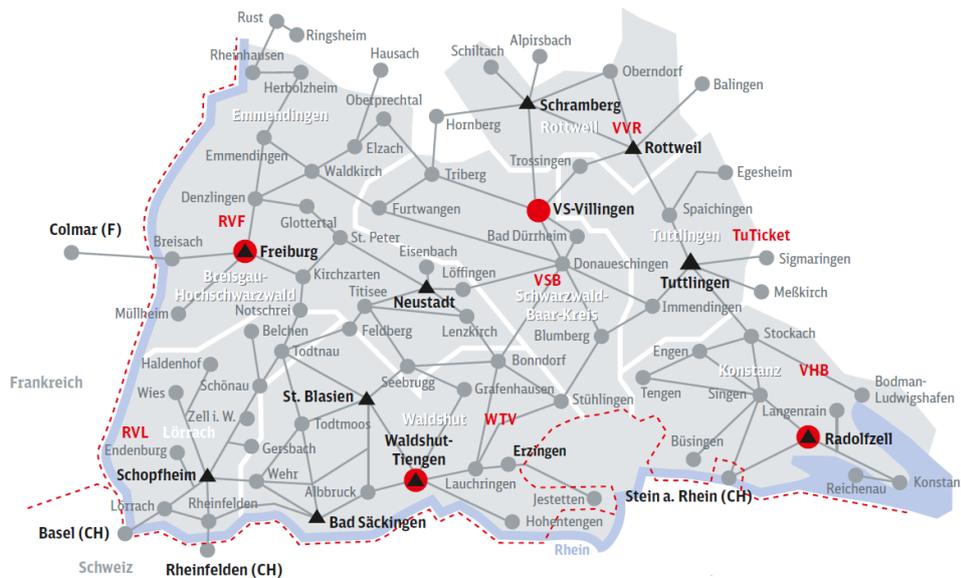


Abb. 01 Streckengebiet der SBG Südbadenbus GmbH

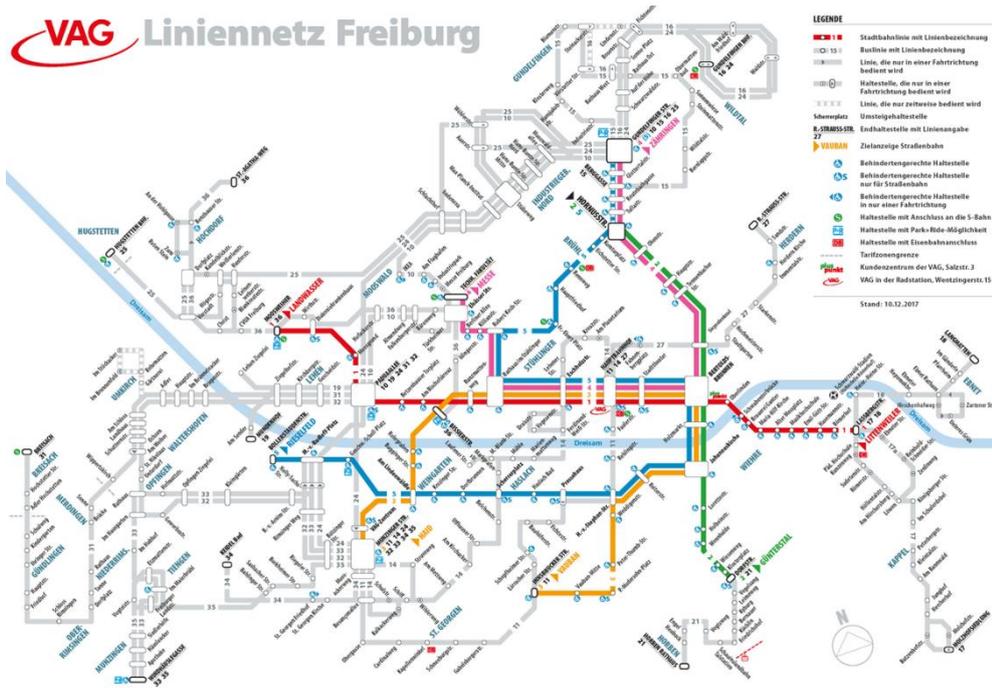
1.2.4 Freiburger Verkehrs-AG (VAG)

Die VAG betreibt den ÖPNV mit Stadtbahnen und Bussen in der Stadt Freiburg sowie im direkten Umfeld (ca. 5 km). Eine Ausnahme bilden lediglich die Busverbindungen ins rund 30 km entfernte Breisach. Das Unternehmen transportiert jährlich rund 80 Mio. Fahrgäste (Stadtbahn und Bus) und betreibt dabei 18 Buslinien mit 65 Bussen.

Die Freiburger Verkehrs-AG verfolgt seit Jahren die Entwicklung und den Markt nach alternativen Antrieben im Busbereich. Frühere Tests erstreckten sich auf die jeweiligen Ermittlungen des Entwicklungs- und Technologiestandes und die Eignung für den Betriebseinsatz.

Im Jahr 2016 hat die Freiburger Verkehrs AG zusammen mit dem Fraunhofer Institut IVI die Eignung des Freiburger Liniennetzes für den Einsatz von Elektrobussen mit Batterien untersucht und bewertet. Im Ergebnis zeigte sich, dass durch das bestehende Straßenbahnnetz, an der die Buslinien jeweils starten und enden, der Einsatz von Batteriebussen mit Gelegenheitsladung gut geeignet ist. Darauf aufbauend erfolgte die gemeinsame Erstellung einer Einführungsstrategie. Ende 2019 wird die VAG nun die erste Pilotlinie für Elektrobusse mit Gelegenheitsladung in Betrieb nehmen. Der weitere Ausbau auf Elektrobusse soll anschließend sukzessive folgen, wobei die weitere Technologieentwicklung sowohl in der Batterie- als auch in der Brennstoffzellenentwicklung berücksichtigt werden soll.

Gerade die Ergänzung von Gelegenheitsladung und BZ-Range-Extender wird aktuell als ideale Ergänzung für die Erreichbarkeit der Umlandgemeinden sowie für den flexiblen Einsatz bei Umleitungsverkehren oder bei Schienenersatzverkehr gesehen.



Einführung

Abb. 02 Streckengebiet der VAG Freiburg

2

Erhebung der Fahrzeugspezifikationen alternativer Antriebe (AP1)

Der Markt der in Deutschland zugelassenen 79.438 Omnibusse (ÖPNV inkl. Reisebusse, Stand 01/2018, [18]) ist dominiert durch Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, wobei Dieselfahrzeuge mit einem Anteil von 97,1 % Gesamtfahrzeugbestand am weitesten verbreitet sind. Im Bereich der Stadt- und Regionalbusse (Gesamtanzahl 35.483, Stand 2017, [42]) sind zudem Fahrzeuge mit Erdgasmotoren zu finden, die jedoch in Summe lediglich einen Anteil von 2,2 % an den Bestandsfahrzeugen haben. (Stand 01/2014, [19])

Alternative, lokal CO₂-freie Antriebsformen sind momentan nur in sehr geringen Stückzahlen und in wenigen Städten zu finden. Im Jahr 2017 sind in Deutschland lediglich 528 Busse mit alternativen Antrieben zugelassen gewesen. Der größte Anteil entfiel dabei auf Diesel-Hybrid-Busse (357 Stück), gefolgt von batterieelektrischen (88 Stück) und brennstoffzellenelektrischen Bussen (12 Stück). Zusätzlich sind 71 Oberleitungsbusse zugelassen gewesen, die sich jedoch auf nur drei Städte mit entsprechenden Oberleitungsnetzen beschränken. [34]

Grundsätzlich kann bei alternativen Antriebsformen zwischen der direkten und der indirekten Nutzung von (erneuerbarem) Strom unterschieden werden (siehe Abb. 03). Die direkte Nutzung ist dabei zum einen mittels Oberleitungen und zum anderen über Batterien möglich. Aufgrund der hohen Anfangsinvestitionen, insbesondere für den Aufbau eines Oberleitungsnetzes, werden Oberleitungs- oder Trolleybusse heutzutage fast ausschließlich in Städten eingesetzt, die bereits über ein solches Netz verfügen (in Deutschland z.B. Esslingen, Eberswalde, Solingen) [34]. Bei den Bewertungen der Busstrecken im Großraum Freiburg wird diese Technologie deshalb nicht berücksichtigt. In den nachfolgenden Kapiteln 2.12 und 2.33 werden die Grundlagen der alternativen Fahrzeugantriebe sowie der zugehörigen Lade-/Tankinfrastruktur für Batterie- und Wasserstoffbrennstoffzellenbusse vorgestellt. Als Referenztechnologie wird im Kapitel 2.1 der konventionelle Dieselantrieb beschrieben.

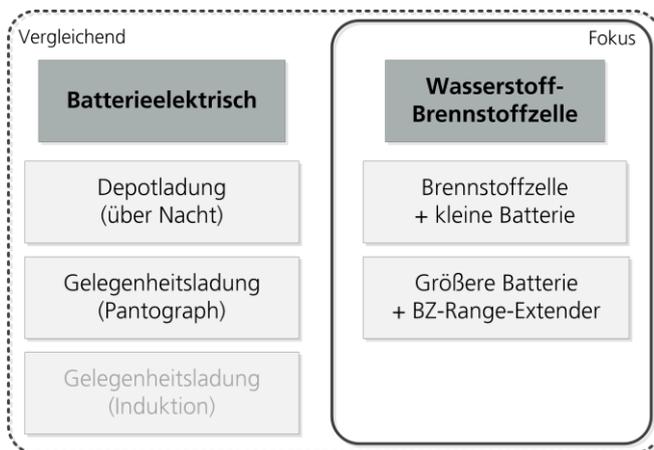
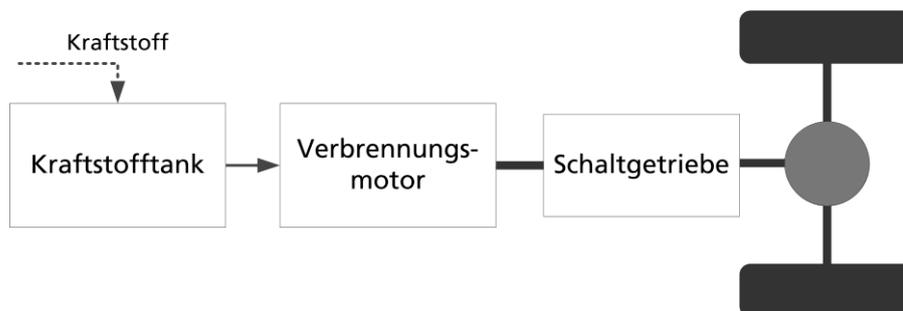


Abb. 03 Übersicht der im Projekt betrachteten Antriebskonzepte

2.1 Omnibusse mit Dieselantrieb

Ein Dieselantrieb besteht aus den drei Hauptkomponenten Kraftstofftank, Verbrennungsmotor und Schaltgetriebe (siehe Abb. 04). Der Kraftstofftank dient dabei als Energiespeicher während der Fahrt. Der Diesel-Kraftstoff wird im Motor unter Zugabe von Luft verbrannt und dabei die im Kraftstoff gespeicherte chemische Energie in Expansionsarbeit umgewandelt und diese über einen Kolben und eine Kurbelwelle in

eine Drehbewegung übersetzt. Die Kurbelwelle überträgt die Drehbewegung über ein Schaltgetriebe letztlich auf die Räder des Busses, wodurch dieser angetrieben und die ursprünglich eingesetzte chemische Energie (Kraftstoff) in Bewegungsenergie mündet.



Erhebung der
Fahrzeugspezifikationen
alternativer Antriebe (AP1)

**Abb. 04 Schematischer
Aufbau eines Diesel-
Antriebsstrangs**

Stadt- und Regionalbusse mit Verbrennungsmotoren haben eine durchschnittliche Lebensdauer zwischen 10 und 15 Jahren, in der sie eine Laufleistung von etwa 60.000 km/a absolvieren [32, 36, 37]. Anschließend sind die Kosten für eine weitere Instandhaltung häufig so hoch, dass ein Weiterbetrieb, gerade bei größeren Flotten, nicht mehr wirtschaftlich darstellbar ist. Die Fahrzeuge werden dann häufig verkauft.

Bundesweit gibt es 14.459 öffentlich zugängliche Tankstellen (Stand 2019, [23]) sowie eine nicht bekannte Anzahl an privaten Tankstellen, die sich im Besitz von Transportunternehmen (z.B. Stadtwerken) befinden. Eine flächendeckende Kraftstoffversorgung ist in Deutschland somit jederzeit und an jedem Ort gegeben. Die in diesem Projekt beteiligten Busunternehmen Südbadenbus und VAG Freiburg verfügen zudem über betriebseigene Tankstellen auf den jeweiligen Betriebshöfen, an denen der Großteil der Fahrzeuge betankt wird. Hierdurch werden längere Anfahrten zu öffentlichen Tankstellen vermieden und die Verfügbarkeit ist zu jedem Zeitpunkt gegeben. Es ist davon auszugehen, dass größere Stadtbusbetreiber in der Regel über eigene Tankstellen verfügen und nur maximal zusätzlich auf das öffentliche Tankstellennetz zurückgreifen.

2.2 Omnibusse mit Batterieantrieb

Busse mit elektrischem Antrieb, egal ob batterie- oder brennstoffzellenelektrisch, wandeln chemisch gespeicherte Energie in elektrische Energie und anschließend in Bewegungsenergie um. Für den letzten Wandlungsschritt sind Elektromotoren erforderlich.

Bei derzeit am Markt verfügbaren batterie- bzw. wasserstoffelektrischen Bussen sind drei unterschiedliche Konzepte zu beobachten (siehe Abb. 05). Der Einsatz eines Zentralmotors mit Differentialgetriebe ist eine verbreitete Variante. Dabei ist lediglich ein großer Motor nötig. Nachteilig ist jedoch, dass die Rekuperation (Rückgewinnung) von Bremsenergie bei dieser Bauform nicht möglich ist. Zudem ist der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs geringer und Einbauraum und Wartungsaufwand sind größer als bei der Verwendung radnaher Motoren. [4]

Bei der Nutzung radnaher Motoren kann auf die Verwendung eines Differentialgetriebes verzichtet werden. Je angetriebenem Rad ist jedoch ein kleines Getriebe zur Übersetzung der Drehzahl nötig. Größter Vorteil radnaher Motoren ist die Möglichkeit, Bremsenergie zurück zu gewinnen und damit den Energieverbrauch des Fahrzeuges zu reduzieren. [4]

Die konsequente Entwicklung hin zu weniger bewegten Bauteilen führt letztlich zu Radnabenmotoren. Diese sind direkt und ohne weiteres Getriebe mit dem angetriebenen Rad verbunden und sind ebenfalls in der Lage Bremsenergie rückzugewinnen. [4]

Batterieelektrische Busse (BEB) sind erst seit kurzer Zeit am Markt erhältlich, wenngleich bislang nicht alle Hersteller solche Modelle im Angebot haben. Die Kosten für deren Anschaffung sind deutlich höher als für gleichartige Dieselsebusse und liegen derzeit zwischen 550.000 und 650.000 Euro.

Nachfolgend werden zwei gängige Varianten von Batteriebussen beschrieben. Dabei wird zwischen Bussen mit Depotladung (siehe Kapitel 2.2.1) und Gelegenheitsladung (siehe Kapitel 2.2.2) unterschieden.

Erhebung der
Fahrzeugspezifikationen
alternativer Antriebe (AP1)

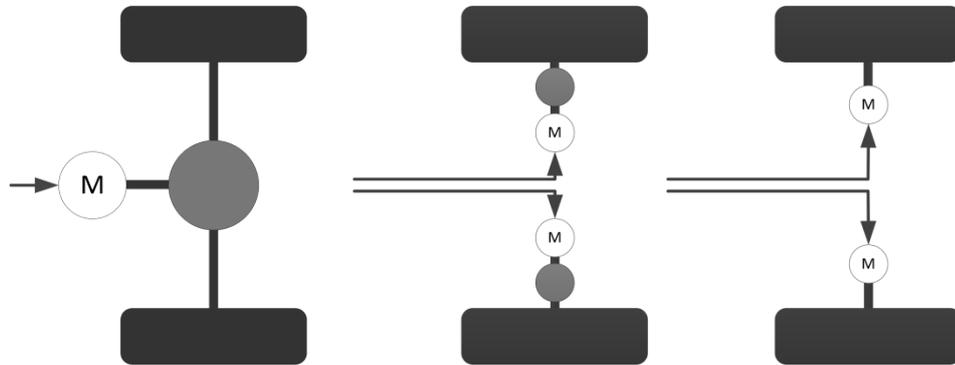


Abb. 05 Schematische Darstellung unterschiedlicher Motorkonzepte
Links: Zentralmotor
Mitte: Radnaher Motor mit Getriebe
Rechts: Radnabenmotor

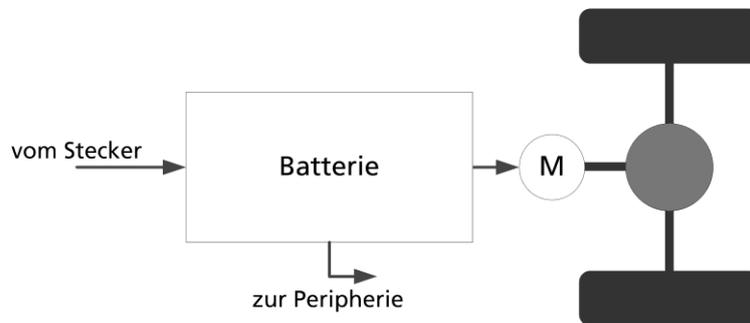
In den nachfolgend dargestellten Technologien ist stets ein Zentralmotor zur Erzeugung der mechanischen Energie dargestellt, wobei der Einsatz von radnahen Motoren oder Radnabenmotoren ebenfalls möglich und gängig ist.

Der Markt für batterie- und auch wasserstoffelektrische Busse ist sehr jung und von einer derzeit von großer Innovationskraft geprägt. Dies hat zur Folge, dass fortwährend überarbeitete und auch neue Modelle auf den Markt kommen, welche sich hinsichtlich technischer Aspekte, wie Batteriekapazität, Reichweite oder Verbrauch, teils signifikant von den Vorgängermodellen unterscheiden. Die nachfolgenden Auflistungen erheben daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit und können bereits bei Veröffentlichung nicht mehr auf dem aktuellen Stand sein.

Grundsätzlich ist zudem zu beachten, dass die aufgelisteten Hersteller und Modelle in einem unterschiedlichen Stadium der Marktreife sind. Die Modelle von etablierten Busherstellern, wie etwa Solaris, VDL, Evobus, BYD oder van Hool, sind technisch dabei am ausgereiftesten. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass Modelle chinesischer Hersteller derzeit zum Teil noch nicht den europäischen Qualitätsstandards entsprechen. Sowohl in der Verarbeitung des Antriebsstrangs als auch der Karosserie / des Interieurs kann es erhebliche Unterschiede zum gewohnten Standard europäischer Hersteller geben, was sich letztlich auf die Lebensdauer der Fahrzeuge auswirkt. Die teils geringeren Anschaffungskosten chinesischer Modelle relativieren sich dadurch. Es ist jedoch davon auszugehen, dass auch die chinesischen Hersteller ihre Modelle in den kommenden Jahren weiter verbessern und für den europäischen Markt überarbeiten werden.

2.2.1 Depotladung

In Abb. 06 ist der schematische Aufbau eines Batteriebusses mit Depotladung (Nachtladung) dargestellt. Die elektrische Energie zum Antrieb des Zentralmotors wird direkt aus der Batterie entnommen.



Erhebung der
Fahrzeugspezifikationen
alternativer Antriebe (AP1)

**Abb. 06 Schematischer
Aufbau eines Batteriebusses
mit Depotladung**

Omnibusse mit Depotladung verfügen mit einer Akkuladung in der Regel über eine Reichweite zwischen 200 und 300 km. Um diese zu erreichen, werden in den Bussen Batterien mit einer Gesamtkapazität von 225 – 480 kWh verbaut. Rechnerisch ergibt sich dadurch ein Verbrauch zwischen 1,0 und 1,9 kWh/km. Die Batterien des Busses werden über Nacht im Busdepot über einen Stecker geladen. In Tab. 01 ist eine Übersicht über aktuell, bzw. in naher Zukunft, am Markt verfügbare Batteriebusse mit Depotladung zu finden. Diese wurde im Rahmen des Projekts durch den assoziierten Partner Südbadenbus / DB Regio recherchiert und zusammengestellt.

| Hersteller | Model | Antrieb | Reichweite | Kapazität | Reichweite | Quelle |
|---------------|--------------------|---------|------------|-----------|------------|----------|
| | | | km | kWh | kWh/km | |
| Alstom | Aptis | zentral | ~200 | ~350 | 1,8 | DB Regio |
| BYD | Ebus 12 | radnah | ~250 | 380 | 1,5 | DB Regio |
| Caetano | E-City Gold | zentral | <250 | 85-250 | 1,0 | DB Regio |
| Ebusco | 2.2 | zentral | 300-400 | 362-475 | 1,2 | [11] |
| Ebusco | 3.0 | zentral | > 500 | k.A. | k.A. | [10] |
| Evobus | eCitaro | radnah | >150 | 146-292 | ~1,9 | [8] |
| Ebe Europe | Blue City Bus 12 m | beides | <230 | 318 | 1,1 | DB Regio |
| Iveco-Heuliez | GX 337 Elec | zentral | <300 | 360 | 1,2 | DB Regio |
| MAN | Lions's City 12 E | zentral | <250 | 280 | 1,9 | DB Regio |
| Sileo | S12 | radnah | <280 | 300 | 1,1 | DB Regio |
| SOR | NS 12 Electric | zentral | k.A. | 225 | k.A. | DB Regio |
| Temsa | Avenue Electron | radnah | k.A. | 320 | k.A. | DB Regio |
| Volgabus | City-Rhythm-12 E | radnah | k.A. | 300 | k.A. | DB Regio |
| Yutong | E 12 | zentral | k.A. | 374 | k.A. | DB Regio |

Erhebung der
Fahrzeugspezifikationen
alternativer Antriebe (AP1)

Tab. 01 Aktuell am Markt verfügbare Batteriebusse mit Depotladung

Für das Laden der Busse ist eine entsprechende Infrastruktur erforderlich. Die Depotladung erfolgt häufig über einen Stecker, über den der Bus abends mit der Ladestation verbunden wird. In Abhängigkeit der Ladeleistung wird dabei zwischen „Slow charger“ (15 – 22 kW), „Fast Charger“ (22 – 50 kW) und „Rapid Charger“ (50 - 120 kW) unterschieden. Für das vollständige Laden eines Akkus sind je nach Leistung zwischen 10 h (Slow) und 2-6 Stunden (Fast, Rapid) nötig. [30]

Aufgrund der vergleichsweise geringen Ladeleistungen ist in der Regel ein Strombezug über das Niederspannungsnetz möglich. Aufgrund der langen Ladezeiten ist ein Verhältnis von Ladestationen zu Bussen von 1:1 nötig. [17]

Aufgrund derzeit noch fehlender internationaler Standards existiert momentan eine Vielzahl unterschiedlicher Steckerdesigns. Diese sind häufig nur mit der Buchse des gleichen Herstellers kompatibel, weshalb das Laden eines Busses an der Ladestation eines fremden Herstellers in der Regel nicht möglich ist. Zusätzlich zu dieser mechanischen Inkompatibilität fehlen auch einheitliche Kommunikationsschnittstellen zwischen Fahrzeug und Ladestation. Die Normungsverfahren sind bereits angestoßen, sodass hier auf absehbare Zeit Besserung zu erwarten ist. [17]

In Deutschland sind Stand November 2019 rund 315 batterieelektrische Busse zugelassen, weitere ca. 750 sind bestellt. Eine genaue Aufschlüsselung in Depot- und Gelegenheitslader ist leider nicht möglich. [41]

Erhebung der
Fahrzeugspezifikationen
alternativer Antriebe (AP1)

2.2.2 Gelegenheitsladung mittels Pantograph

Der Begriff Gelegenheitsladung beschreibt eine mehrfach tägliche, kurzzeitige Ladung der Akkus, etwa an Endhaltestellen. In Abb. 07 ist der schematische Aufbau eines Batteriebusses mit Gelegenheitsladung via Pantograph dargestellt. Die elektrische Energie zum Antrieb des (Zentral-)Motors wird auch hier direkt aus der Batterie entnommen.

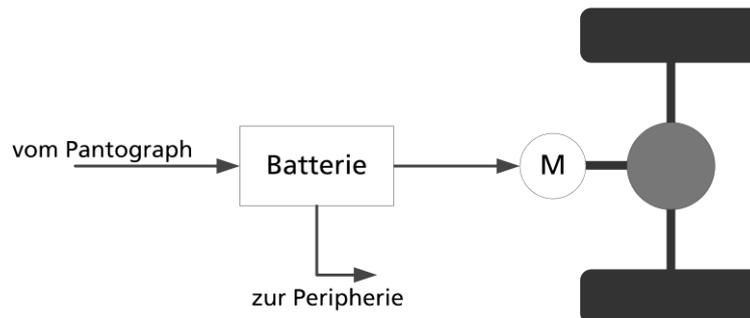


Abb. 07 Schematischer Aufbau eines Batteriebusses mit Gelegenheitsladung

Omnibusse mit Gelegenheitsladung verfügen mit einer Vollladung der Akkumulatoren über Reichweiten zwischen 42 und 280 km, die somit unterhalb derer von BEB mit Depotladung liegt. Die Kapazität der eingesetzten Batterien beträgt 20 – 363 kWh und ist ebenfalls als die von BEB mit Depotladung. Um trotz dieser geringeren Reichweite ähnliche tägliche Umlauflängen erreichen zu können, werden die Busse über einen sogenannten Pantographen an ausgewählten Haltestellen nachgeladen (siehe unten). Der mittlere Energiebedarf von BEB mit Gelegenheitsladung liegt bei 1,0 – 2,5 kWh/km und unterscheidet sich damit nur unwesentlich von BEB mit Depotladung. In Tab. 02 ist eine Übersicht über aktuell, bzw. in naher Zukunft, am Markt verfügbare Batteriebusse mit Gelegenheitsladung zu finden. Diese wurde im Rahmen des Projekts durch den assoziierten Partner Südbadenbus / DB Regio recherchiert und zusammengestellt.

| Hersteller | Model | Antrieb | Reichweite | Kapazität | Reichweite | Quelle |
|--------------------|-------------------------------|---------|------------|-----------|------------|----------|
| | | | km | kWh | kWh/km | |
| Bolloré | Bluebus 12 m | zentral | 250-280 | <272 | 1,0 | DB Regio |
| Chariot Motors* | | zentral | 42 | 20-40 | 1,0 | DB Regio |
| Ebusco | 2.2 | zentral | 300-400 | 362-475 | 1,2 | [11] |
| Ebusco | 3.0 | zentral | > 500 | k.A. | k.A. | [10] |
| Ekova | Electron 12 | radnah | ~60-200 | 86-265 | 1,3 | DB Regio |
| Evobus | eCitaro | radnah | >150 | 146-292 | ~1,9 | DB Regio |
| Linkker | 12+/12 LF | zentral | k.A. | 60-170 | k.A. | DB Regio |
| Rampini* | E 120 | zentral | k.A. | 240 | k.A. | DB Regio |
| Scania* | Citywide LF Electric | zentral | ~45-60 | 150 | 2,5 | DB Regio |
| Solaris | Urbino 12 Electric | beides | ~60-200 | 240 | 1,2 | DB Regio |
| VDL | Citea SLE- 120 Electric | zentral | k.A. | 288 | k.A. | DB Regio |
| Volvo | 7900 Electric | zentral | <200 | 250 | 1,3 | DB Regio |

Erhebung der
Fahrzeugspezifikationen
alternativer Antriebe (AP1)

**Tab. 02 Aktuell am Markt
verfügbare Batteriebusse mit
Gelegenheitsladung**

mit Stern* gekennzeichnete Modelle sind ausschließlich Gelegenheitslader, die Übrigen können auch als Depotlader betrieben werden.

Gelegenheitsladung von Bussen erfolgt häufig an zentralen Umstiegs- oder Endpunkten, an denen sich mehrere Linien kreuzen. Auf diese Weise kann die Infrastruktur von einer möglichst großen Anzahl an Fahrzeugen genutzt und auf diese Weise spezifische Kosten reduziert werden. Die elektrische Verbindung zwischen Fahrzeug und Ladestation wird dabei über einen sogenannten Pantographen hergestellt, der entweder an der Station oder auf dem Dach des Fahrzeugs befestigt ist und sich entsprechend absenken oder anheben lässt. Derzeit scheint sich dabei die Variante durchzusetzen, bei der der Pantograph auf dem Fahrzeug installiert ist. Diese hat den Vorteil, dass der Pantograph bei jeder Wartung im Depot leicht überprüft werden kann und der Ausfall eines Pantographen lediglich einen Bus betrifft und nicht eine Station, die mehrere Busse versorgt. Die leicht höheren Investitionskosten für Busse mit Pantograph fallen dabei nur gering ins Gewicht.

Aufgrund der kurzen Aufenthaltszeiten der Busse an solchen Haltestellen von ca. 10 Minuten, erfolgt das konduktive Gelegenheitsladen mit einer vergleichsweise hohen Leistung von 150 bis 750 kW [17, 30].

Zusätzlich werden häufig im Busdepot Lademöglichkeiten installiert, um die Batterien auch nachts laden zu können, dann allerdings mit geringeren Ladeleistungen. Auf diese Weise können die Batterien regenerieren. Beschleunigte Alterungseffekte, die durch das Schnellladen am Tag verursacht werden können, werden abgemildert.

2.3 Omnibusse mit Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb

Omnibusse mit Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb nutzen chemische Energie in Form von Wasserstoffgas. Die in der Elektrolyse zur Erzeugung des Wasserstoffs eingesetzte elektrische Energie wird somit nur indirekt eingesetzt.

In diesem Projekt wird unterschieden zwischen Brennstoffzellenbussen und Batteriebussen mit Brennstoffzellen-Range-Extender, die sich vor allem in der Größe des H₂-Tanks, der Li-Ionen-Batterie und ggf. auch der Brennstoffzelle unterscheiden.

Erhebung der
Fahrzeugspezifikationen
alternativer Antriebe (AP1)

2.3.1 Brennstoffzellenbusse (BZ)

In Abb. 08 ist der schematische Aufbau eines Wasserstoff-Brennstoffzellenbusses dargestellt.

H₂-Brennstoffzellenbusse werden über einen Dispenser mit Wasserstoffgas betankt (die Nutzung von tiefkaltem, flüssigem Wasserstoff wird momentan nicht verfolgt). Der Wasserstoff wird im Fahrzeug gasförmig unter Druck gespeichert, wobei der Druck, je nach Hersteller, zwischen 350 und 700 bar liegt. Das Fassungsvermögen der Drucktanks liegt bei rund 30 bis 40 kg (vgl. Tab. 03). In der Brennstoffzelle kann das Gas zusammen mit Luftsauerstoff bedarfsgerecht zu elektrischem Strom und Wärme umgewandelt werden. Die Leistung der Brennstoffzelle beträgt etwa 100 kW. Der entstandene Strom wird direkt in einem Elektromotor in Bewegungsenergie umgewandelt und treibt das Fahrzeug an. Zum Bremsen des Busses unter gleichzeitiger Rückgewinnung der Bremsenergie fungiert der Elektromotor zusätzlich als Generator. Die dabei entstehende elektrische Energie kann in einer zusätzlichen kleinen Batterie mit einer Kapazität < 30 kWh zwischengespeichert und bei hohem Energiebedarf (z.B. Anfahrvorgang) genutzt werden. [15]

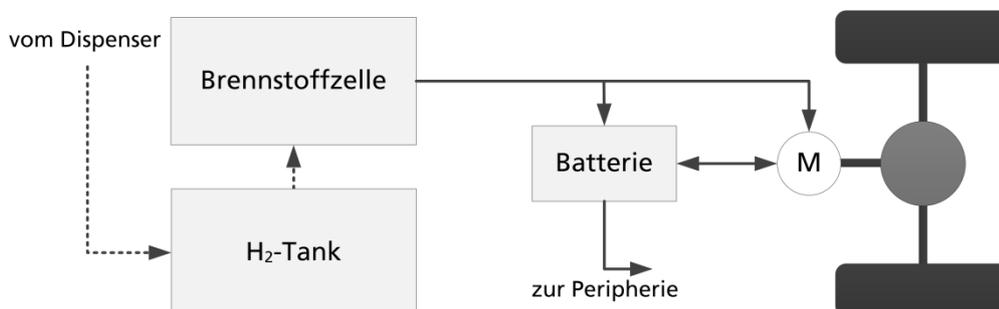


Abb. 08 Schematischer Aufbau eines Brennstoffzellenbusses

Die nachfolgende Tab. 03 listet eine Auswahl bereits jetzt bzw. in naher Zukunft verfügbarer Brennstoffzellenbusse auf. Aufgrund des dynamischen Marktumfelds und der Vielzahl, gerade chinesischer Hersteller, erhebt die Tabelle keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Es ist zu sehen, dass der Inhalt des H₂-Tanks bei 30 bis 40 kg und die Batteriekapazitäten im Bereich unterhalb 30 kWh liegen. Damit ergeben sich Reichweiten einer Tankfüllung zwischen 250 und 350 km sowie ein mittlerer Verbrauch von etwa 10 kg Wasserstoff je 100 km.

| Hersteller | Modell | Tankinhalt | Batterie | Reichweite | Verbrauch | Quelle |
|------------|------------------------|------------|----------|------------|-----------|----------|
| | | kg | kWh | km | kg/100 km | |
| Caetano | H2.City Gold | 37,5 | k.A. | < 400 | > 6,0 | [7, 26] |
| Solaris | Urbino nE12H2 | 34 | 29,2 | >350 | 7,8-12,1 | [38] |
| Van Hool | A 330 Fuel Cell Europe | 38 | 24/36 | 350 | 9,0-11,0 | [31, 40] |

Erhebung der
Fahrzeugspezifikationen
alternativer Antriebe (AP1)

Tab. 03 Aktuell am Markt verfügbare H₂-Brennstoffzellenbusse

Zur Betankung von Brennstoffzellenbussen ist eine entsprechende Infrastruktur erforderlich. Diese besteht in der Regel aus den Gruppen „H₂-Erzeugung“, „H₂-Transport und -speicherung“ sowie „H₂-Tankstelle“. In [35] werden Erzeugung und Transport zusammengefasst und die H₂-Tankstelle dagegen in „Kompression und Speicherung“ sowie „Befüllung“ untergliedert (vergleiche Abb. 09). Da sowohl die Betankungsstützen am Fahrzeug als auch die Dispenser an der Tankstelle international normiert sind, ist eine Betankung von Bussen unterschiedlicher Hersteller an der gleichen Tankstelle problemlos möglich. Die Erzeugung des Wasserstoffs kann dabei direkt am Ort der Tankstelle (on-site) oder in naher (near-site) und weiter (off-site) Entfernung erfolgen. Der Art des anschließenden Transports (LKW, Pipeline) kann frei gewählt werden. Dargestellt sind zudem unterschiedliche Tankstellentechnologien, welche in flüssige und gasförmige Betankung unterschieden werden können, wobei für letztere drei technische Ausgestaltungen dargestellt sind.

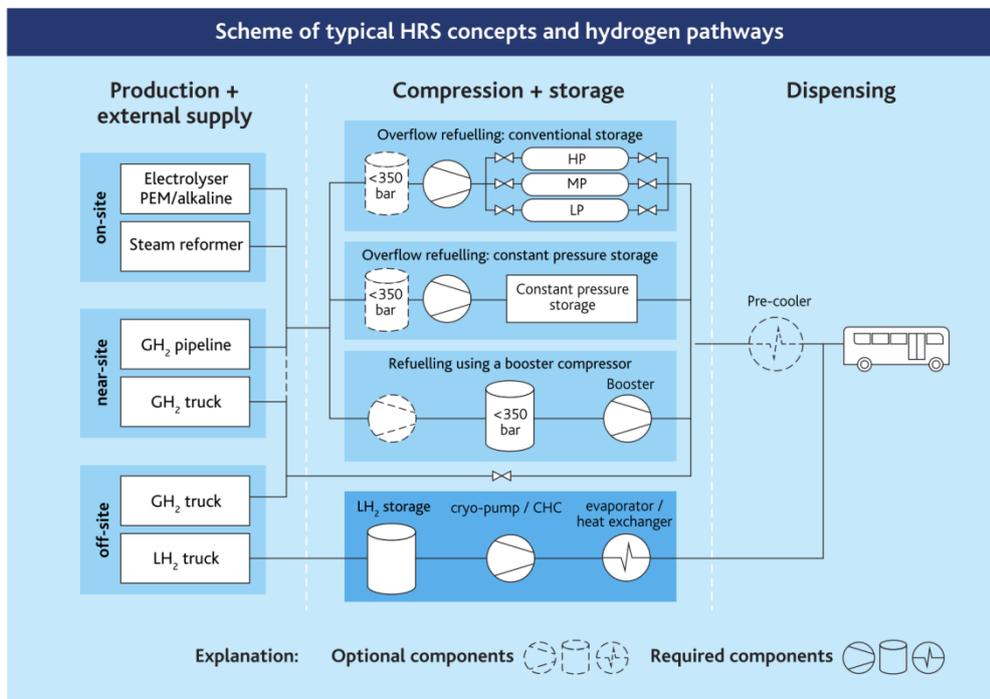


Abb. 09 Schematische Übersicht unterschiedlicher Möglichkeiten der Kombination aus H₂-Erzeugung und Wasserstofftankstelle (HRS) (aus [35])

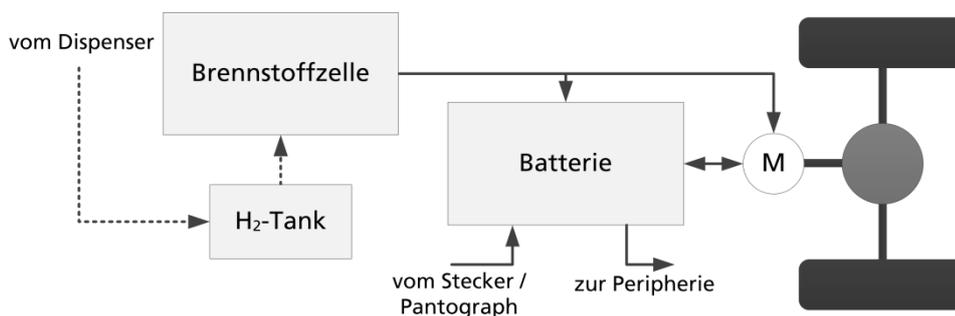
In Europa ist bereits eine Vielzahl von Brennstoffzellenbussen in öffentlich geförderten Projekten in Betrieb genommen worden. Mit Beginn des Projekts CUTE im Jahr 2001 wurden die ersten 27 Brennstoffzellenbusse in Betrieb genommen und diese Anzahl im

Folgeprojekt HyFleet:CUTE auf 47 gesteigert. Im EU-Projekt CHIC wurden 54 Brennstoffzellenbusse in 8 Ländern angeschafft und erstmals auch die erforderliche Tankinfrastruktur berücksichtigt [25]. Das Projekt JIVE (Joint Initiative for Hydrogen Vehicles across Europe) förderte die Anschaffung von 144 Brennstoffzellenbussen von 22 Projektpartnern in 5 Mitgliedsstaaten [16]. Während des aktuell laufenden Nachfolgers JIVE2 sollen bis Ende 2023 weitere 152 Brennstoffzellenbusse in 14 Städten zum Einsatz gebracht werden [13].

Die Anzahl kommerziell angeschaffter bzw. bestellter Fahrzeuge steigt in Deutschland erst in den letzten zwei Jahren nennenswert an. So haben der Regionalverkehr Köln GmbH und die Wuppertaler Stadtwerke Anfang 2018 insgesamt 40 Wasserstoffbusse bestellt und damit den größten Auftrag für H₂-Busse in Europa bis dahin ausgelöst, die noch in 2019 in Betrieb genommen werden sollen [31]. Kleinere Stückzahlen waren im März 2018 in Frankfurt, Hamburg, Mainz, Münster, Stuttgart und Wiesbaden ausgeschrieben bzw. bereits bestellt [5].

2.3.2 Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-REX)

Bei BZ-REX-Bussen handelt es sich genau genommen um Batteriebusse, die zusätzlich mit einer Brennstoffzelle zur Verlängerung der Reichweite ausgestattet wurden. Es handelt sich somit um eine Mischform von Batteriebus und Brennstoffzellenbus, deren Ziel es ist, die Vorteile beider Technologien zu kombinieren (siehe Abb. 10). Die elektrische Energie für den Antrieb kommt dabei vorrangig aus der Batterie, welche durch die Brennstoffzelle nachgeladen werden kann.



Erhebung der
Fahrzeugspezifikationen
alternativer Antriebe (AP1)

Abb. 10 Schematischer Aufbau eines Batteriebusses mit Brennstoffzellen-Range-Extender

Der H₂-Tank ist mit bis zu 30 kg Inhalt etwas kleiner als bei BZ-Bussen, wohingegen die Batterie mit 70 – X00 kWh deutlich größer als bei BZ-Bussen, jedoch kleiner als bei reinen Batteriebussen ist (siehe Tab. 04). Das Konzept vereint damit den Vorteil hoher Wirkungsgrade durch die direkte Nutzung von Strom aus der Batterie mit der großen Reichweite durch den Einsatz der Brennstoffzelle zur Reichweitenverlängerung.

| Hersteller | Modell | Tankinhalt | Batterie -kapazität | Reichweite | Verbrauch | Quelle |
|-----------------------|------------------|------------|------------------------|------------|-----------|----------|
| | | kg | kWh | km | kg/100 km | |
| Businova | Safra H2 | 28 | 132 | > 300 | k.A. | [14, 22] |
| EBE Europa | Blue City Bus | 30 | 84,5 | ~ 350 | 7,0 | DB Regio |
| Solbus | SM12 H2FC | 30 | 74 | 430 | k.A. | [27] |
| Ursus City | Smile CS12CF | 30 | 74 | 450 | 7,0 | [33] |
| Xcelsior Charge H2 | New Flyer | 37,5/60 | 700/1.100 | 450-560 | k.A. | [28] |

Erhebung der
Fahrzeugspezifikationen
alternativer Antriebe (AP1)

Tab. 04 Aktuell am Markt
verfügbare Batteriebusse mit
Brennstoffzellen-Range-
Extender

Analog zu BZ-Bussen können auch BZ-REX-Busse mittels der 350-bar-Technik mit Wasserstoff betankt werden. Gleichzeitig ist, analog zur Batteriebusse, ein Laden der eingebauten Batterie mittels Gelegenheits- oder Übernachtladung möglich. Dabei können sowohl Stecker als auch Pantographen zum Einsatz kommen.

Somit wird für den Betrieb von BZ-REX sowohl die Infrastruktur zum Laden von Elektrobussen (entweder ON oder OC) als auch zum Betanken von BZ-Bussen benötigt. Die Lade- bzw. Betankungsleistung der jeweiligen Infrastruktur kann jedoch kleiner dimensioniert werden, als bei Verwendung nur einer der beiden Varianten, sodass die Kosten für die Anschaffung der nötigen Infrastruktur für BZ-REX geringer sind, als die Summe der Infrastruktur für Batteriebusse und BZ-Busse.

Von den in Tab. 04 aufgelisteten Modellen ist derzeit noch keins in der Serienfertigung angekommen. Vielmehr handelt es sich um erste Kleinstserien oder Einzelmodelle, die derzeit noch in der Erprobung sind. Aufgrund des dynamischen Marktumfelds und der Vielzahl, gerade chinesischer Hersteller, erhebt die Tabelle keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Zudem gibt es bislang keine nennenswerten Erfahrungen im größeren Maßstab mit dieser Bustechnologie, von Demonstrationsvorhaben mit einstelligen Anzahlen an Bussen abgesehen.

2.4 Kostenrechnung

2.4.1 Grundlagen der Berechnung der Total Cost of Ownership

Gemäß Definition besteht die Hauptaufgabe der Kostenrechnung darin „(...) die für unternehmerische Entscheidungen notwendigen Informationen zu liefern“ [20]. Für den Vergleich unterschiedlicher Busantriebstechnologien, wie es in diesem Projekt nötig ist, bieten sich grundsätzlich produktorientierte Ansätze des Kostenmanagements an. Mit Produkt ist aus Sichtweise des Busbetreibers hier das Fahrzeug gemeint. Geeignete Ansätze sind hier sowohl die Total Cost of Ownership (TCO) als auch die Lebenszykluskosten (Life Cycle Costing, LCC). Die Begriffe TCO und LCC werden dabei häufig nicht sauber voneinander abgegrenzt und mitunter synonym verwendet. Während TCO vor allem bei der Beschaffung von (Verbrauchs-)Gegenstände verwendet wird, bei denen die Transaktionskosten (z.B. Verwaltungskosten) vernachlässigt werden, sind in der LCC sämtliche Kosten über einen Produktlebenszyklus enthalten, auch die Transaktionskosten.

Da es sich bei der Anschaffung von Bussen durch einen Busbetreiber um eine größere Investition handelt und die Transaktionskosten somit von untergeordneter Bedeutung sind, wird für die Kostenberechnung in diesem Projekt TCO verwendet. Berücksichtigt werden dabei:

 Erhebung der
 Fahrzeugspezifikationen
 alternativer Antriebe (AP1)

- Investitionskosten (CAPEX) Fahrzeug
- Investitionskosten Tank- / Ladeinfrastruktur
- Wartungskosten Fahrzeug
- Wartungskosten Tank- / Ladeinfrastruktur
- Kraftstoff- / Stromkosten
- Kosten für Fahrpersonal

Die Entsorgung des Fahrzeugs wird vernachlässigt, da angenommen wird, dass das Fahrzeug nach Ablauf einer gewissen Betriebsdauer auf dem Gebrauchtmkt weiterverkauft wird.

Bei der TCO werden alle bekannten Kosten über die Lebensdauer (hier: Nutzungsdauer des Busbetreibers) aufsummiert und durch die zurückgelegte Fahrstrecke in diesem Zeitraum dividiert:

$$TCO = \frac{\text{Gesamtkosten}}{\text{Fahrstrecke}}$$

Die Gesamtkosten setzen sich dabei wie folgt zusammen,

$$TCO = \frac{CAPEX + OPEX - \text{Restwert}}{\text{Fahrstrecke}}$$

wobei gilt:

$$CAPEX = CAPEX_{\text{Fahrzeug}} + CAPEX_{\text{Tank-/Ladeinfrastruktur}} + CAPEX_{\text{Ersatz}}$$

$$OPEX = \text{Wartung}_{\text{Fahrzeug}} + \text{Wartung}_{\text{Infrastruktur}} + \text{Energiekosten} + \text{Personal}$$

In Abb. 11 sind die Bestandteile der Total Cost of Ownership schematisch dargestellt.

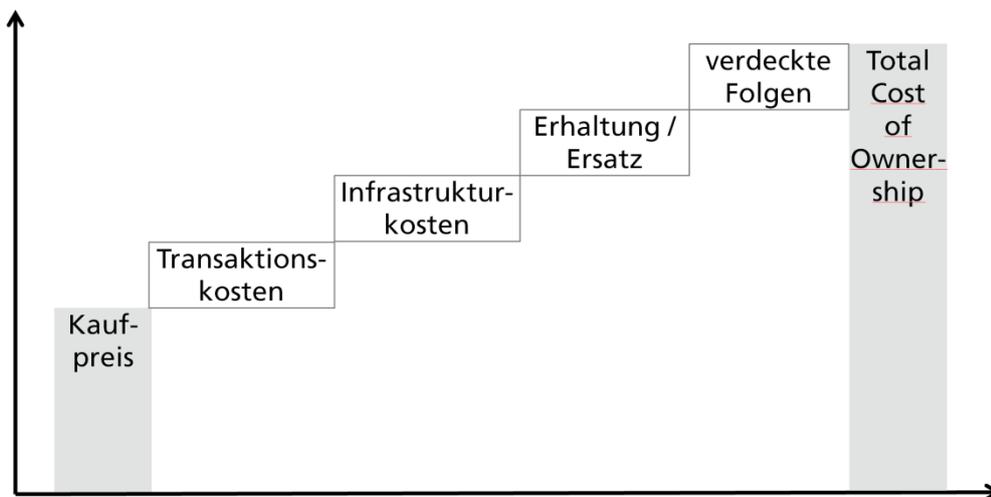


Abb. 11 Schematische Darstellung der Total Cost of Ownership

2.4.2 TCO von Busantriebstechnologien in der Literatur

Die Berechnung von TCO ist ein in der Literatur weit verbreitetes Vorgehen zum ökonomischen Vergleich von Busantriebstechnologien. Teilweise wird dabei von der Berechnung von Life Cycle Costing gesprochen, wobei die Unterscheidung häufig schwierig ist (siehe Kapitel 2.4.1). Bei der Darstellung der in der Literatur verfügbaren spezifischen Kosten in Abb. 12 wird daher noch zwischen TCO und LCC unterschieden, wenngleich im weiteren Projektverlauf TCO gerechnet werden.

Erhebung der
Fahrzeugspezifikationen
alternativer Antriebe (AP1)

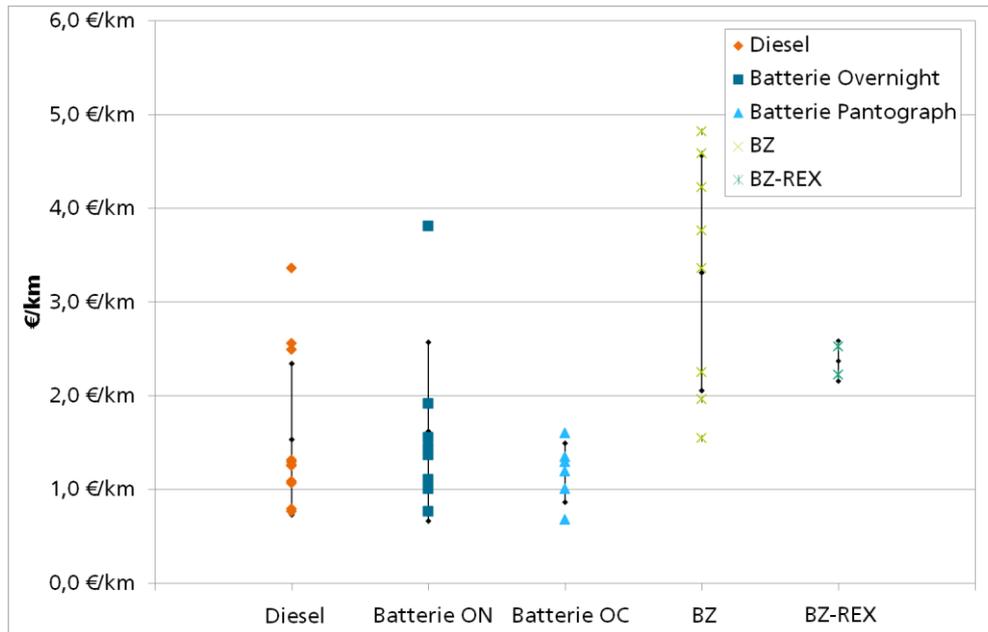


Abb. 12 Übersicht über die TCO für unterschiedliche Bussysteme in der Literatur

Dargestellt sind die spezifischen Kosten pro zurückgelegtem Kilometer während der Nutzungsdauer der Fahrzeuge aus neun unterschiedlichen Quellen [1–3, 9, 21, 24, 29, 30, 40]. Diese wurden teils aus Drittwährungen in €/km und mittels einer angenommenen jährlichen Inflation vom Jahr der jeweiligen Veröffentlichung auf das Referenzjahr 2019 umgerechnet.

Es ist zu sehen, dass auch innerhalb einer Technologie teils deutliche Streuungen auftreten. So liegen die spezifischen Kosten bei Dieselmotoren zwischen 0,76 und 3,36 €/km (Mittelwert 1,70 €/km), bei Batteriebusen (ON) zwischen 0,76 – 3,80 €/km (1,62 €/km), bei Batteriebusen (OC) zwischen 0,67 – 1,59 €/km (1,18 €/km), bei BZ-Bussen zwischen 1,54 – 4,82 €/km (3,27 €/km) und bei BZ-REX-Bussen zwischen 2,22 – 2,52 €/km (2,37 €/km). Die geringste Streuung weisen BZ-REX-Busse auf, wobei hier lediglich zwei Datenpunkte verfügbar waren.

Es ist zu berücksichtigen, dass in den unterschiedlichen Literaturquellen mit teils unterschiedlichen Annahmen und Betrachtungsräumen gerechnet wird. Während die meisten Quellen keine Kosten für CO₂-Verschmutzungszertifikate berücksichtigen, geschieht dies bei [3, 29] und [3]. Zudem schwankt die zugrunde gelegte Nutzungsdauer der Fahrzeuge zwischen 10 – 20 Jahren, wobei sich Dieselmotoren eher im unteren und Elektrobusse (sowohl Batterie als auch Brennstoffzelle) eher im oberen Bereich wiederfinden. Auch weitere Einflussfaktoren, wie etwa die Kosten für Errichtung und Betrieb der Infrastruktur oder Kapitalkosten (z.B. durch Zinszahlungen) werden unterschiedlich gewichtet und berücksichtigt.

Zusammenfassend gibt die Vielzahl der hier recherchierten Quellen einen Überblick über die Spannweite der spezifischen Kosten für den Betrieb von Bussen unterschiedlicher Antriebe. Eine Aussage über die voraussichtlichen Kosten für ein

spezielles Projekt ist jedoch nicht möglich, weshalb diese in diesem Projekt neu berechnet werden.

Erhebung der
Fahrzeugspezifikationen
alternativer Antriebe (AP1)

3

Erhebung der Busstrecken /-umläufe im geplanten Einzugsgebiet (AP2)

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Busumläufe erhoben und weiterverarbeitet wurden, um sie auf ihre Eignung für die vier oben genannten Bustypen untersuchen zu können. Es wird davon ausgegangen, dass sich verschiedene Faktoren unterschiedlich stark auf die Reichweite eines Busses auswirken. Die von den Busunternehmen zur Verfügung gestellten Daten werden hierfür mittels ArcGIS Pro erfasst, verarbeitet, analysiert und präsentiert. Anschließend wird ein Auswertungsskript mit Hilfe der Software Python erstellt. Dieses ermöglicht es, die Erkenntnisse aus ArcGIS mit den Eigenschaften der vier Bustypen zu vergleichen und festzustellen, ob ausgewählte Umläufe für ihre Verwendung geeignet sind.

Im ersten Schritt werden dafür Indikatoren erarbeitet, anhand derer bewertet werden kann, ob ein Umlauf für den Einsatz der Busse geeignet ist. Darauf aufbauend sollen Daten beschafft werden, die eine Antwort auf diese Fragestellung bieten. Zunächst werden die Daten so bearbeitet, dass sie in dem Geographischen Informationssystem ArcGIS Pro eingepflegt und digitalisiert werden können. Die daraus resultierenden Strecken- bzw. Umlauflängen und die Steigungen werden für die Auswertung benötigt.

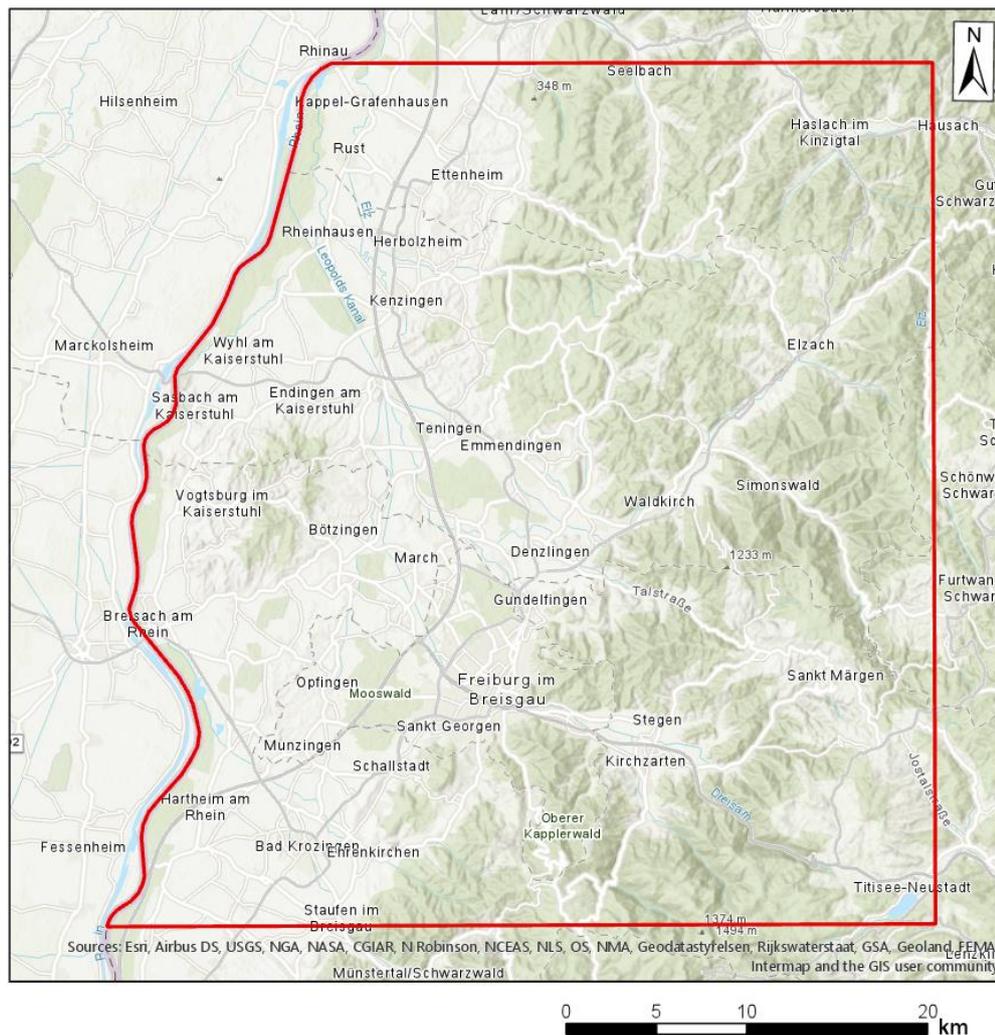
Im nächsten Schritt soll ein Auswertungsskript mittels Python erstellt werden, welches verschiedene Indikatoren und Einflussfaktoren teilautomatisiert für die Bewertung einzelner Busumläufe berücksichtigt. Die durchschnittliche Reichweite der Busse wird hierin mit den Umlauflängen und weiteren energieverbrauchenden und somit reichweitereduzierenden Faktoren verglichen.

Als letzter Schritt soll eine Bewertung der Umläufe mittels des Auswertetools erfolgen. Hierbei soll die Frage geklärt werden, welche Umläufe auf welche Bustypen umgerüstet werden könnten. Die durchschnittliche Reichweite der Busse wird hierin mit den Umlauflängen und weiteren energieverbrauchenden und somit reichweitereduzierenden Faktoren verglichen.

3.1 Betrachtungsraum

Der untersuchte Großraum Freiburg i. Br. liegt im Südwesten von Deutschland und reicht von der Mitte des Schwarzwaldes bis zum Rhein. Wie in Abb. 13 zu sehen ist, erstreckt sich das Gebiet von Bad Krozingen im Südwesten bis Rust im Nordwesten, von Haslach im Kinzigtal im Nordosten bis Titisee-Neustadt im Südosten. Es deckt damit eine Fläche von etwa 2.000 km² ab.

Aufgrund des Schwarzwaldes ist der östliche Teil des Gebiets durch eine Mittelgebirgslandschaft geprägt, während die westlich gelegene Topographie der Oberrheinebene kaum Höhenunterschiede aufweist.



Erhebung der Busstrecken /
umläufe im geplanten
Einzugsgebiet (AP2)

**Abb. 13 Topografische
Darstellung des Großraums
Freiburg**

Für die Untersuchung der Buslinien auf ihre Eignung für die vier Fahrzeugtypen ist das Landschaftsbild von Bedeutung. Bei Buslinien, die auf den Straßen des Oberrheingraben oder in der Stadt Freiburg fahren, müssen Steigungen kaum berücksichtigt werden. Hingegen müssen bei Fahrten über den Kaiserstuhl und in den Schwarzwald Höhendifferenzen überwunden werden.

3.2 Datenerhebung

Für die Umsetzung des Projekts werden neben den Angaben der Parameter für die Einflüsse auch Daten benötigt, die in ArcGIS Pro eingelesen werden können. Aus diesen Daten müssen Buslinienverläufe bzw. die Wege der Umläufe ersichtlich sein. Werden keine Tagesumläufe, sondern einzelne Buslinien in separaten Dateien gestellt, werden die Umlaufpläne benötigt. Aus diesen Plänen müssen für jeden Umlauf die Häufigkeit einer gefahrenen Linie und der Wechsel zu anderen Linien herausgelesen werden können.

Die GPS-Koordinaten aller Buslinien befinden sich bei den Daten der VAG in einer Text-Datei, wobei jedoch jede Linie eine spezifische Linien-Bezeichnung besitzt. Diese spezifischen Linien-Bezeichnungen unterteilen die Fahrtwege der Linien in verschiedene Wochentage, Tageszeiten bzw. in Hin- und Rückwege. Neben den Koordinaten der statischen GPS-Wegpunkte der Busse entlang ihrer Linien sind in der Datei u.a. auch

die gefahrene Distanz zwischen zwei Punkten, die Haltezeiten an jedem Punkt und die Namen der Haltestellen zu finden. Welche Linien ein Bus innerhalb eines Umlaufs fährt kann aus den Umlaufplänen herausgelesen werden.

Erhebung der Busstrecken /-
umläufe im geplanten
Einzugsgebiet (AP2)

Die SBG stellt die geographische Position aller vorhandenen Haltestellen in ihrem Betriebsgebiet als X- und Y-Koordinaten im UTM-Format alphabetisch sortiert in einer Excel-Tabelle bereit. In weiteren Excel-Dateien sind die jeweiligen Umläufe und ihre Umlauflängen enthalten. Darin wird aufgelistet, welche Haltestellen nacheinander von einem Bus angefahren werden. Die Haltestellenkoordinaten sind hierin nicht enthalten. Um die Haltestellenbezeichnungen mit ihren dazugehörigen Koordinaten zu verbinden, wird eine weitere Excel-Tabelle erstellt.

3.3 Benötigte KPI sowie Annahmen und Randbedingungen

Dazu werden Key-Performance-Indicators ausgewählt, um daraus den Energiebedarf eines jeden Umlaufs ermitteln und in einem Auswertungsskript mit den Eigenschaften der Bustypen vergleichen zu können. Mit Hilfe der KPI kann demnach bewertet werden, ob ein welcher Umlauf für welchen Bustypen geeignet ist. Weitere Kriterien, wie die Leistung eines Busses, werden nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass sie in dieser Hinsicht den Anforderungen eines Busses mit konventionellem Antrieb entspricht.

Der erste Indikator betrifft die Länge der Umläufe der Busse in Kilometer. Je länger der Umlauf ist, desto höher muss die Reichweite eines Fahrzeugs sein, damit er diesen bewältigen kann. Dabei wird davon ausgegangen, dass nach Beendigung eines Tagesumlaufs das Fahrzeug betankt wird.

Der zweite KPI betrachtet die Steigung der Straße in Prozent. Mit der Steigung nimmt der Energieverbrauch zu, wodurch die Reichweite wiederum abnimmt. Innerhalb von Freiburg sind die Steigungen und Neigungen vernachlässigbar, da es kaum Höhenunterschiede gibt. Es gibt jedoch auch Fahrten, die über den Kaiserstuhl und in den Schwarzwald führen. Auf diesen Strecken sind Steigungen von bis zu 18 % möglich.

Neben diesen KPI werden noch weitere Informationen benötigt, um eine technische Bewertung der Fahrtstrecken durchführen zu können. Bedeutsam ist in erster Linie die Reichweite der Busse mit gefülltem Tank. Die von den Herstellern angegebenen Reichweiten der Busse berücksichtigen keine zusätzlichen Verbräuche oder Steigungen. Zu unterscheiden ist dabei, ob eine Heizung oder Klimaanlage während der Fahrt genutzt wird. Diese Verwendung wirkt sich auf den Energieverbrauch und damit auf die Reichweite aus.

Die tatsächliche Anzahl der Haltestellen in den Umläufen sowie die Geschwindigkeit werden nicht in die Berechnung einbezogen, da diese bereits in den Herstellerangaben zur Reichweite enthalten sind. Darüber hinaus wird eine mittlere Beladung der Busse darin schon berücksichtigt, weswegen zusätzliches Gewicht und damit der Energieverbrauch zu Stoßzeiten zu vernachlässigen ist. Außerdem sind die Pausenzeiten der Busfahrer nicht von Bedeutung, da beim Stillstand des Fahrzeuges keine Energie verbraucht wird.

3.4 Berechnung der Rest-Reichweite

Die Beurteilung der Busumläufe anhand der einflussnehmenden Faktoren erfolgt dahingehend, wie viele Kilometer der Reichweite eines Bustyps am Ende eines Umlaufs noch vorhanden bzw. zu welcher Länge die Reichweite überschritten ist.

Für die Berechnung der Rest-Reichweite (Rest-RW) ohne Betankung gemäß der Gleichung 3.1.

Erhebung der Busstrecken /-
umläufe im geplanten
Einzugsgebiet (AP2)

$$\text{Rest RW} = \text{RW} - \text{Länge}_{\text{ges}} - \text{Puffer} - \text{ST} - \text{HZ} - \text{Klima} - \text{VZ}_{\text{HZ}} - \text{VZ}_{\text{Klima}} \quad (3.1)$$

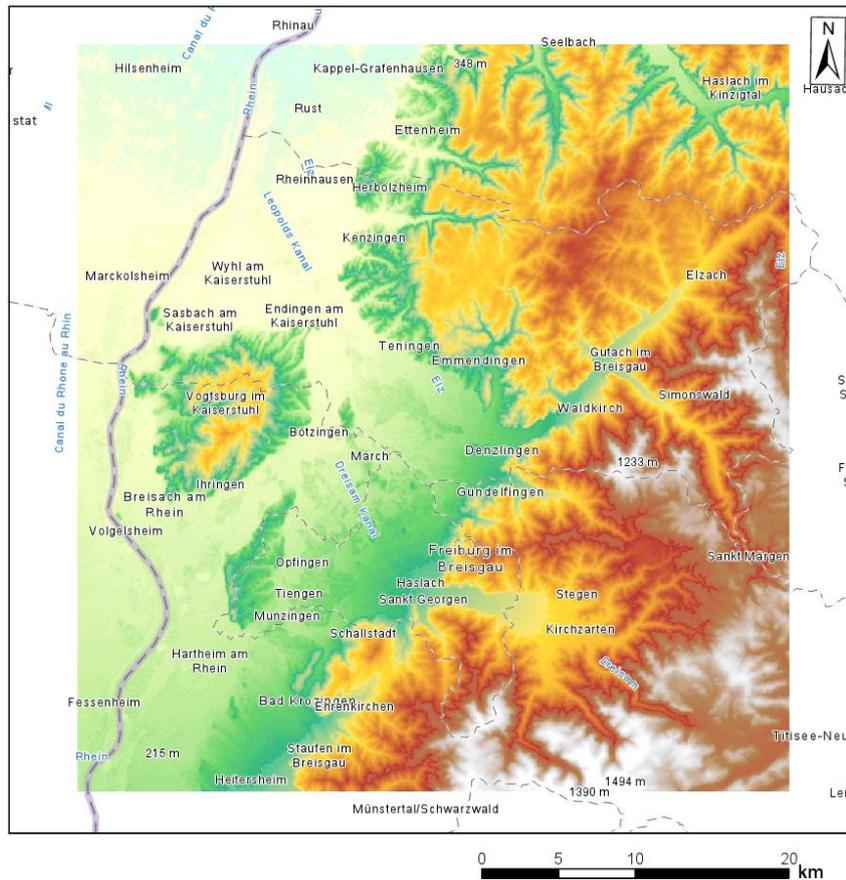
wird zunächst die Gesamtlänge der Strecken bzw. des Umlaufs ($\text{Länge}_{\text{ges}}$) und ein Puffer von der Reichweite des Busses subtrahiert. Davon werden auch die Einflüsse der Steigung (ST), Heizung (HZ), Klimaanlage (Klima) und Verzögerung (VZ_{HZ} bzw. VZ_{Klima}) abgerechnet, die zuvor in eine Längeneinheit überführt werden. Ein Einfluss, der nicht betrachtet werden soll, wird auf null gesetzt. Damit hat dieser keine Auswirkung auf die Berechnung. Das daraus resultierende Ergebnis ist die Rest-Reichweite in Kilometer. Sie kann positiv oder negativ sein, je nachdem ob die Reichweite des Busses ausreichend ist oder nicht. Diese Berechnung wird für auf alle vier Bustypen angewandt.

3.5 Überführung in ArcGIS Pro und Verwendung des Python-Skripts

Die Fragestellung, welche Busstrecken sich im Großraum Freiburg i. Br. für die Nutzung von Bussen mit Brennstoffzellenantrieb eignen, kann u.a. mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) beantwortet werden. Diese Geoinformationssysteme ermöglichen die Darstellung von raumbezogenen Daten mit Hilfe einer Software, in diesem Fall mit ArcGIS Pro der Firma ESRI. Dies dient vor allem dazu, komplexe Zusammenhänge zu verdeutlichen und damit auch Fragestellungen mit Raumbezug, wie beispielsweise Streckenlängen oder Steigungen, beantworten zu können. Die Software dient dazu, die Streckenverläufe der aktuellen Buslinien zu visualisieren und zu analysieren. Damit können Streckenlängen oder Steigungen ermittelt werden.

3.5.1 Streckenerhebung mit ArcGIS Pro

Zu Beginn werden die für die Visualisierung notwendigen Rasterdaten in ArcGIS Pro importiert. Damit wird das Relief im Großraum Freiburg dargestellt, wie in Abb. 14 zu sehen ist. Die Koordinaten der GPS-Punkte bzw. der Haltestellen können nun in ArcGIS Pro eingelesen werden.



Erhebung der Busstrecken /
Umläufe im geplanten
Einzugsgebiet (AP2)

**Abb. 14 Karte des Großraums
Freiburg im Höhenmodell**

Die Daten der VAG stellen, wie in Kapitel 3.1 bereits erwähnt, statische GPS-Wegpunkte der Buslinien dar. Durch das Einlesen der Text-Datei entsteht deshalb ein Netz aus nahe beieinanderliegenden Point-Features entlang der Straßen auf der Karte.

Ein ähnliches Bild kommt mit den Daten der Umläufe der SBG zustande, wobei die einzelnen Punkte aufgrund der Entfernungen der Haltestellen weiter auseinanderliegen. Die Umläufe sind wochentagabhängig, weshalb jeweils der Tag mit dem längsten Umlauf für die Visualisierung in ArcGIS ausgewählt wird. Alle weiteren Umläufe der anderen Tage decken sich in großen Teilen mit dem ausgewählten Tag. Es kann folglich angenommen werden, dass kürzere Umläufe an anderen Tagen ähnliche oder größere Rest-Reichweiten als der ausgewählte Umlauf in der Auswertung erreichen werden. Es kommt auch vor, dass sich Umläufe zu einem großen Teil mit anderen Umläufen decken. Diese werden nicht nochmals in ArcGIS eingelesen. Somit werden insgesamt 36 Umläufe eingelesen.

Die GPS- bzw. Haltestellenpunkte werden über ein Verarbeitungswerkzeug zu Linien verbunden. Mit den abgebildeten Linien bzw. Umläufen und dem vorher eingelesenen und bearbeiteten Rasterdatensatz wird sichtbar, wo eine Linie oder ein Umlauf verläuft und ob dort viele Höhenmeter überwunden werden müssen oder es sich hauptsächlich in ebenem Gebiet befindet. Daraus lassen sich Steigungen für jeden Umlauf bzw. jede Linie erschließen.

Sind alle zu untersuchenden Buslinien in das GIS eingetragen, können sie nun für die technische Bewertung verwendet und analysiert werden. Aus den eingepflegten Daten und den daraus gestalteten Linien bzw. Umläufen kann für jede einzelne Linie eine Datei mit ihrer Umlauflänge abgespeichert und an ein Auswertungsskript übergeben werden.

3.5.2 Bewertung der Umläufe mit Hilfe von Python

Erhebung der Busstrecken /-
umläufe im geplanten
Einzugsgebiet (AP2)

Bei diesem Auswertungsskript handelt es sich um ein teilautomatisches Tool, das feststellt, ob ein derzeit bestehender Umlauf ohne Veränderungen mit den vier Bustypen besetzt werden kann. Das Skript dient dazu einen besseren Überblick zu behalten und eine einfache Ausführung der Bewertung mit Hilfe einer geeigneten Software zu gewährleisten. Es bietet sich an, hierfür das Programm Python zu verwenden, da es standardmäßig eine Schnittstelle mit ArcGIS enthält. Anhand der in ArcGIS eingetragenen Busumläufe und der bestimmten KPIs soll die technische Bewertung der einzelnen Umläufe erfolgen.

Ein Tool für die Analyse zu verwenden, bringt einige Vorteile mit sich. Die für die Bewertung notwendigen KPIs oder Faktoren können nicht vergessen oder übersehen werden. Auch die gewählten Parameter bleiben, sofern es nicht im Tool geändert wird, bei jeder Analyse gleich. Damit sind die Ergebnisse vergleichbar. Dieses Tool kann auch für andere Städte bzw. Gebiete eingesetzt werden, da die darin enthaltenen Einflüsse auf die Reichweite frei gewählt werden können und die Parameter und Faktoren überall gleich sind. Damit wird auch für jede/n Benutzer*In die Analyse auf dieselbe Art berechnet, ohne dass ein Parameter fehlt. Die festen Werte der Parameter können jedoch leicht angepasst werden, wenn sich durch technologische Verbesserungen beispielsweise die Reichweite oder der Einfluss der Klimaanlage ändert. In der Berechnung selbst sind Rechenfehler ausgeschlossen. Außerdem spart die Nutzung eines Tools viel Zeit, da nicht bei jeder Analyse alles neu eingetragen werden muss.

Das Auswertungsskript überprüft für jeden Bustypen die verbleibende Rest-Reichweite bei einem Umlauf. Dazu kann es aus den gespeicherten Daten aus ArcGIS die Umlauflänge herauslesen und für die Berechnung nutzen. Es kann angegeben werden, ob die durchschnittliche Steigung auf einer Strecke 0-2 %, 2-8 % oder >8 % beträgt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit Betankungen während eines Umlaufs zu berücksichtigen, was in diesem Projekt jedoch nicht gemacht wurde. Außerdem werden bei jedem Durchlauf für alle vier Bustypen gleichzeitig insgesamt drei Szenarien betrachtet. Dabei wird die Rest-Reichweite der Busse

- ohne Einflüsse
- bei Verwendung einer Heizung
- bei Verwendung einer Klimaanlage

berechnet. Das Resultat dieser Berechnung sind zwölf Werte, die als Tabelle abgespeichert werden können.

Voraussetzung für die Verwendung des Tools ist, dass zuvor die zu untersuchenden Linien und Umläufe in das ArcGIS Programm eingetragen und die Dateien mit den Umlauflängen abgespeichert werden. Damit können die sich daraus ergebenden Strecken- bzw. Umlauflängen für das Tool verwendet werden.

4

Erhebung der Situation / Daten an den relevanten Betriebshöfen (AP3)

Erhebung der Situation / Daten an
den relevanten Betriebshöfen
(AP3)

Im Rahmen dieses Projekts sind in AP3 umfangreiche Gespräche mit den assoziierten Partnern geführt und zudem in Vor-Ort-Terminen die jeweiligen örtlichen Gegebenheiten an den Betriebshöfen erfasst worden. Die Gespräche und Begehungen haben mehrere Ziele verfolgt.

Zum einen ist der aktuelle Ist-Stand der Fahrzeugabstellung, des Betriebsablaufs und der Tankinfrastruktur erfasst worden. Zum anderen wurden die technischen und betrieblichen Möglichkeiten zur Realisierung möglicher künftiger Wasserstoffbusprojekte auf dem jeweiligen Betriebshof erhoben und analysiert. Nachfolgend sind die Ergebnisse dieses Arbeitspakets für die beiden Partner Freiburger Verkehrs-AG (VAG) und Südbadenbus GmbH (SBG) dargestellt.

4.1 Freiburger Verkehrs-AG (VAG)

Der Betriebshof der VAG wurde am 18.06.2019 besichtigt. Der Betriebsleiter Herr Waibel führte über das Gelände und stand für Fragen zur Verfügung. Im Folgenden wird zunächst der Ist-Zustand zum Zeitpunkt der Besichtigung beschrieben und anschließend auf mögliche Anpassungen für den künftigen Einsatz von H₂-Bussen eingegangen.

4.1.1 Ist-Zustand

Die Freiburger Verkehrs-AG betreibt in der Besançonallee in Freiburg ihren zentralen Bus- und Trambetriebshof. Dort sind alle Stadtbusse und der Großteil der Trambahnen stationiert.

Der Betriebshof liegt in der Besançonallee in Freiburg. Das Gelände hat eine Fläche von ca. 99.000 m², wobei die Gebäude (Wartungs- und Abstellhallen sowie Bürogebäude) etwa ein Drittel der Fläche einnehmen. Der für die Stadtbusse genutzte Bereich umfasst rund 24.000 m². Das Gelände ist umgeben von der typischen Bebauung eines Industriegebiets. Im Norden und Osten verlaufen mehrspurige Straßen, die nächste Wohnbebauung auf der gegenüberliegenden Straßenseite ist mindestens 75 m von der Grundstücksgrenze entfernt. Im Süden und Westen grenzen Industriebetriebe unmittelbar an das Gelände der VAG an. Eine Ausnahme bildet ein Wohngebäude, welches an der südwestlichen Ecke unmittelbar angrenzt.

Die Busse werden über Nacht stets in der Abstellhalle untergestellt. Diese ist auch im Winter auf mindestens 6 °C frostfrei geheizt und verfügt über ausreichend Stellplätze für alle ca. 65 Busse der VAG.

Die VAG bedient vom Betriebshof in der Besançonallee alle Strecken in Freiburg. Die morgendliche Ausfahrt inkl. Schulverkehr und Spitzenabdeckung umfasst zu Schulzeiten 58 Busse, wobei 26 dieser Busse zwei Ein- und Ausfahrten pro Tag vornehmen. Um den Schulverkehr, insbesondere in den Morgenstunden, abdecken zu können, werden existierende Buslinien mit zusätzlichen Fahrzeugen verstärkt. Eine separate Beförderung von Schüler*Innen, etwa auf zusätzlichen Linien, gibt es nicht.

Bei der Disposition der Fahrzeuge auf den unterschiedlichen Strecken wird aktuell lediglich in Solo- und Gelenkbusse unterschieden. Eine Zuordnung einzelner Fahrzeuge

zu bestimmten Strecken oder Fahrer*Innen erfolgt nicht. Die VAG erhält sich damit größtmögliche Flexibilität der Dienstpläne und des Fahrzeugeinsatzes.

Erhebung der Situation / Daten an
den relevanten Betriebshöfen
(AP3)



Abb. 15 Luftbild des Betriebs Hofes der VAG Freiburg in der Besançonallee, Freiburg. Separat gekennzeichnet ist der derzeitige Busabstellbereich

Der Betriebs Hof der VAG in Freiburg verfügt über eine eigene Tankstelle zur Kraftstoffversorgung der dort stationierten 65 Busse. In unterirdischen Tanks werden 3x 45.000 L Dieselkraftstoff und 1x 1.000 L AdBlue gelagert. Neuer Kraftstoff wird in flexiblen Intervallen, je nach Marktpreislage und Reservehaltung, angeliefert. Im Schnitt erfolgen eine bis drei Lieferungen pro Woche.

Für die Betankung betriebseigener PKW gibt es eine separate Zapfsäule für Benzin, welches in einem unterirdischen Tank mit 15.000 L bevorratet wird. Zusätzlich existiert ein unterirdischer Tank für Heizöl, das über eine weitere Zapfsäule zur Verfügung gestellt wird. Aufgrund der geringeren Besteuerung wird das Heizöl ausschließlich in den Bussen zur Wärmeerzeugung für die Innenraumbeheizung eingesetzt.

Die Omnibusse werden nur bei Bedarf und somit nicht täglich betankt. Im Mittel benötigt jeder Bus pro Tag ca. 120 L Dieselkraftstoff. Die mittlere Dauer einer Vollbetankung beträgt ca. 5 Minuten.

Das Gelände ist über mehrere Transformatoren an das öffentliche Netz angeschlossen. Bis Ende 2021 ist die Schaffung eines neuen Mittelspannungsnetzanschlusses für die Versorgung batterieelektrischer Busse geplant, welche momentan beschafft werden.

Die Verfügbarkeit der Busse beträgt 98 %. Eine Nichtverfügbarkeit kann durch planmäßige Wartungen, TÜV/HU sowie durch ungeplante Ausfälle (z.B. technische Probleme) entstehen.

Auf den Dachflächen der Abstell- und Wartungshallen sind großflächig Photovoltaikmodule zur Stromerzeugung installiert. Diese Anlagen werden durch einen Pächter betrieben und der Strom ins öffentliche Netz eingespeist. In der Zukunft ist geplant, diese Flächen zur Eigenbedarfsdeckung zu nutzen.

4.1.2 Mögliche Anpassungen für den Einsatz von H₂-Bussen

Erhebung der Situation / Daten an
den relevanten Betriebshöfen
(AP3)

Nach Aussage der VAG ist auf dem Betriebshof keine Fläche von ca. 200 bis 400 m² vorhanden, die für die Errichtung einer Wasserstofftankstelle genutzt oder umgewidmet werden könnte. Aktuelle Freiflächen, z.B. die Wiese südlich der Bushalle oder die Wiese nördlich der Grundstückszufahrt, werden entweder bereits für Behelfslösungen genutzt oder sollen perspektivisch genutzt werden.

Sollten bei Nutzung einer hauseigenen Wasserstofftankstelle künftig häufigere Kraftstofflieferungen erforderlich sein, wäre dies aus betrieblicher Sicht möglich. Die VAG legt gleichzeitig Wert darauf, dass sich der CO₂-Fußabdruck der Lieferkette möglichst nicht erhöht.

Der Untergrund des Betriebshofs ist für die Errichtung eines Röhrenspeichers voraussichtlich ungeeignet. Das Gelände wurde in der Nachkriegszeit als Mülldeponie und Tierkörperverwertungsanstalt genutzt. Aus dieser Zeit befinden sich noch Reststoffe im Untergrund, die bei Tiefbauarbeiten in der Vergangenheit immer wieder zu unerwarteten Situationen führten. Großflächige Tiefbauarbeiten, wie sie für die Errichtung eines Röhrenspeicherfelds erforderlich sind, wären nur unter größerem Aufwand möglich.

Auf den vorhandenen Gebäuden ist das Potenzial zur Erzeugung von Strom mittels Photovoltaik bereits ausgeschöpft. Theoretisch denkbar wäre die Errichtung zusätzlicher PV-Anlagen zur teilweisen oder kompletten Überdachung der Hoffläche. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die PV-Anlage oberhalb der existierenden Oberleitungen der Trambahnen in einer Höhe von ca. 5-6 Metern errichtet werden müsste. Zudem dürfte die freie Hoffläche nicht durch zusätzliche Pfosten eingeschränkt werden. Eine Mindestdurchfahrts Höhe müsste jederzeit und überall eingehalten werden.

4.1.3 Geplante Anpassungen für den Einsatz von Batteriebusen

Die VAG stellt bereits jetzt einen Teil der Busflotte auf batterieelektrische Fahrzeuge um. Die ersten beiden Busse des Herstellers Solaris vom Typ Urbino 12 Electric wurden im November 2019 geliefert und sollen ab Anfang 2020 im Linienfahrplan die Strecke der Linie 27 zwischen Herdern und Europaplatz bedienen. An der Haltestelle Rotteckring wurde im Rahmen des Umbaus der Haltestelle in den vergangenen Jahren eine Nachladestation (Pantograph) eingerichtet. Die Investitionskosten werden pro Bus mit 550.000 – 650.000 € angegeben. Perspektivisch ist eine vollständige Umstellung des Fuhrparks der VAG auf emissionsfreie Busse bis 2030 denkbar. [39] Mittelfristig wird sich die Anzahl der Batteriebusse in Freiburg ab dem zweiten Quartal 2022 auf 15 erhöhen, davon 5 Solobusse und 10 Gelenkbusse [3].

Zum Nachladen der Busse im Depot werden auf dem Betriebshof Pantographladestationen nach dem Vorbild des Flughafens Amsterdam Schiphol errichtet (siehe Abb. 16). Zusätzlich soll darauf zusätzlich Photovoltaik zur Stromerzeugung installiert werden. Aus Brandschutzgründen werden die neuen Fahrzeuge dauerhaft außerhalb der vorhandenen Abstellhalle nachgeladen und geparkt. Es werden Pantographen eingesetzt, die auf dem Bus und nicht an der Haltestelle montiert sind. Dadurch können sie in der regelmäßigen Wartungsroutine des Busses mit überprüft werden. Ein technisches Problem am Pantographen führt damit lediglich zum Ausfall des betroffenen Busses und nicht zum Ausfall einer Ladestation, von der mehrere Busse betroffen wären.



**Abb. 16 Pantographlade-
station am Flughafen
Amsterdam Schiphol (Quelle:
[12])**

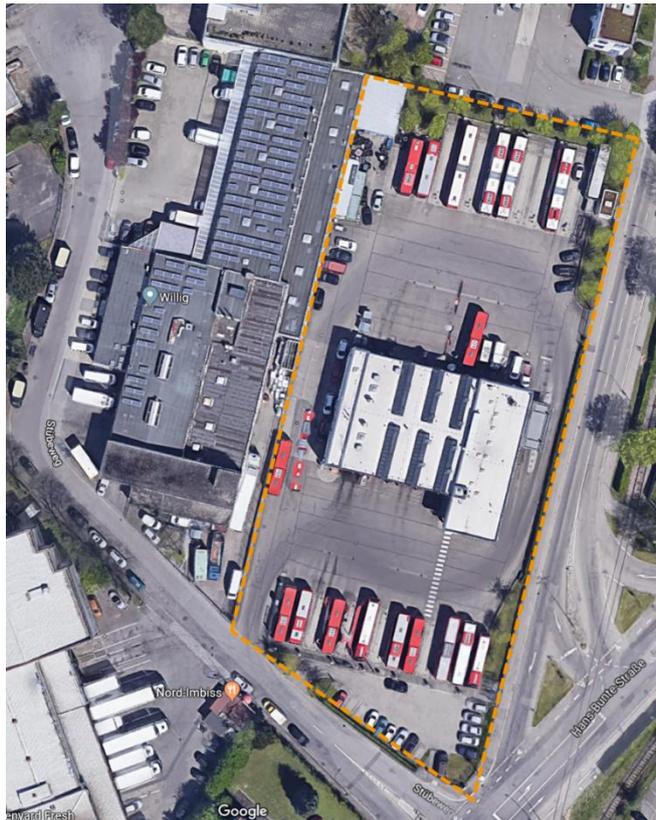
Erhebung der Situation / Daten an
den relevanten Betriebshöfen
(AP3)

4.2 Südbadenbus GmbH (SBG)

Der Betriebshof der SBG wurde im Rahmen des Projekts am 26.04.2019 erstmals besichtigt. Im Folgenden sind die während der Führung und im Nachgang gesammelten Daten zusammengefasst. Zudem wird ein Ausblick auf mögliche Anpassung für den Betrieb von Wasserstoffbussen gegeben.

4.2.1 Ist-Zustand

Der Betriebshof liegt in der Robert-Bunsen-Straße in Freiburg im Industriegebiet Nord. Das Gelände hat eine Fläche von ca. 7.800 m², wobei die zentral stehenden Gebäude (Wartungshalle und Bürogebäude) eine Fläche von etwa 1.100 m² einnehmen. Das Gelände ist umgeben von typischer Bebauung eines Industriegebiets. Zu erwähnen sind zwei Wohngebäude, die südlich und westlich des Grundstücks liegen und jeweils auf der anderen Straßenseite liegen. Die Gebäude liegen jeweils 20,0 m von der Grundstücksgrenze des Betriebshofs entfernt. Auf dem Hof sind Abstellflächen für ca. 9 Gelenkbusse (18 m) und etwa 15 Solobusse (> 12 m) vorhanden.



**Abb. 17 Luftbild des
Betriebshofs der
Südbadenbus in der Robert-
Bunsen-Straße, Freiburg.**

Erhebung der Situation / Daten an
den relevanten Betriebshöfen
(AP3)

Die SBG verfügt im Großraum Freiburg insgesamt über 54 Fahrzeuge, welche von 130 Fahrer*Innen bedient werden. 25 dieser Fahrzeuge sind am Betriebshof Freiburg stationiert und fahren täglich von dort zu ihren Umläufen. Die übrigen 29 Fahrzeuge sind an unterschiedlichen Standorten im Großraum Freiburg stationiert. Dabei handelt es sich um öffentliche Parkplätze, welche das Unternehmen gepachtet hat.

Von den 54 Fahrzeugen sind rund 45 Fahrzeuge täglich im Einsatz, die übrigen Fahrzeuge werden als Reserve vorgehalten. Alle Fahrzeuge werden am Betriebshof Freiburg vor allem gewartet und gereinigt, wobei die außerhalb stationierten Fahrzeuge nicht täglich den Betriebshof anfahren. Von den täglich rund 45 eingesetzten Bussen fahren etwa 35 pro Tag den Betriebshof an. Die übrigen Fahrzeuge kommen am Folgetag, sodass die externen Busse im Schnitt alle zwei Tage am Betriebshof Freiburg sind. Diese Aufenthalte sind in einem separaten Plan geregelt.

Der Betriebshof der SBG in Freiburg verfügt über eine eigene Tankstelle zur Kraftstoffversorgung der dort stationierten 25 Busse. In unterirdischen Tanks werden 2x 50.000 L Dieselmotorkraftstoff und 1x 10.000 L AdBlue gelagert. Etwa alle 2 Wochen wird Kraftstoff geliefert. Der Betriebshof verfügt über eine Genehmigung nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG). Für die Betankung eines Busses werden etwa 6 Minuten pro Tag veranschlagt. Betankungen und auch die Reinigung der Fahrzeuge finden in der Regel gegen 08:00 Uhr und gegen 18:00 Uhr statt, wenn die täglichen Pendlerstoßzeiten vorüber sind. In Summe werden täglich zwischen 3.500 und 4.000 L Dieselmotorkraftstoff vertankt.

Die extern stationierten Fahrzeuge werden in der Regel an öffentlichen Tankstellen betankt, um zusätzliche Anfahrten zu minimieren. Insbesondere die Tankstelle an der Autobahnabfahrt Herbolzheim wird dafür angefahren.

Omnibusse mit Dieselantrieb müssen einmal jährlich zum TÜV und zur Hauptuntersuchung. Eine Wartung durch die SBG findet alle 3 Monate statt.

4.2.2 Mögliche Anpassungen für den Einsatz von H₂-Bussen

Für den Einsatz von Wasserstoffbussen kann vor allem in einer Testphase eine Anpassung einzelner Umläufe erforderlich sein. Die SBG hält dies für problemlos möglich, sofern die Dauer einer solchen Testphase mindestens ein ganzes Jahr beträgt. Auf diese Weise könnte die Testphase in den normalen Fahrplan integriert werden und der hierfür erforderliche Mehraufwand wäre durch die lange Testphase gerechtfertigt. Auch eine theoretisch denkbare, geringere Verfügbarkeit der Brennstoffzellenbusse wäre in einer Testphase akzeptabel und würde keine gravierenden Probleme verursachen.

Sollte gegebenenfalls in einer weiteren Projektphase eine (mobile) Wasserstofftankstelle auf dem Gelände der SBG eingerichtet werden, so stünde hierfür eine Fläche von maximal 100 m² zur Verfügung, die im Norden direkt an das Bürogebäude angrenzt (siehe Abb. 18). Darüber hinaus ist die gesamte Fläche des Betriebshofs in Nutzung und wird auch weiterhin benötigt. Für eine etwaige Speicherung von größeren Mengen Wasserstoff wäre theoretisch eine unterirdische Speicherung, z.B. in einem kleinen Röhrenfeld, denkbar. Der Untergrund sollte laut der Betriebsleitung ausreichend freie Kapazität für die Errichtung eines solchen Speichers aufweisen.

Sofern der benötigte Wasserstoff extern erzeugt und mittels Trailer an den Betriebshof gebracht würde, wäre eine Erhöhung des Liefertakts auf bis zu 3 Lieferungen pro Woche denkbar. Idealerweise erfolgen Kraftstofflieferungen vor 05:00 Uhr, bevor der morgendliche Busverkehr einsetzt.



Abb. 18 Möglicher Standort einer (mobilen) H₂-Tankstelle während einer Testphase

Für den Fall, dass eine On-Site-Erzeugung des Wasserstoffs mittels einer Elektrolyse realisiert würde, stünde nur eine begrenzte Dachfläche zur Errichtung einer Photovoltaikanlage zur Verfügung, die einen Teil des erforderlichen Stroms liefern könnte. Eine theoretisch denkbare vollständige Überdachung des Hofes mit einer Freiflächen-Photovoltaikanlage wird, neben der Beachtung der erforderlichen rechtlichen Rahmenbedingungen, seitens der SBG an die Bedingung geknüpft, dass auf dem gesamten Gelände jederzeit eine Minstdurchfahrthöhe von 4,0 m gewährleistet sein muss.

5

Erhebung weiterer relevanter Randbedingungen (AP4)

Erhebung weiterer relevanter
Randbedingungen (AP4)

Das Arbeitspaket 4 wurde im Rahmen eines halbtägigen Workshops bearbeitet. Für ein breites Bild wurden neben den assoziierten Partnern VAG, SBG und Stadt Freiburg weitere Akteure eingeladen, die nicht als Busverkehrsbetreiber tätig sind, sodass letztlich 11 Teilnehmer*Innen zusammenkamen, darunter Mitarbeiter*Innen der öffentlichen Verwaltung in der Stadt Freiburg und dem Landkreis Breisgau Hochschwarzwald, Geschäftsführer verschiedener regionaler Verkehrsbetreiberunternehmen sowie Mitarbeiter*Innen von regionalen Beratungsunternehmen und Interessensverbänden zu den Themen Wasserstoff und Mobilität.

Ziel des Workshops war es, ein möglichst diverses Bild zu nicht-umlaufspezifischen Randbedingungen zu erhalten, die auf die Bewertung des Potenzials von Wasserstoffbussen (AP5) sowie die Konzepterstellung (AP6) Einfluss haben könnten.

Nach der Vorstellung der Projektziele sowie dem aktuellen Projektstand durch das Fraunhofer ISE wurde der Workshop entlang von drei Leitfragen (entsprechend den nachfolgenden drei Kapiteln) durchgeführt. Die Ergebnisse des Workshops sind in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt.

Im Anschluss an den Workshop wurde durch das Fraunhofer ISE eine Führung durch die institutseigene Wasserstofftankstelle angeboten, an der 7 Personen teilnahmen.



Abb. 19 Teilnehmer*Innen
des Workshops

5.1 Anforderungen, Hemmnisse und Vorteile für die Einführung neuer Antriebstechnologien im ÖPNV

» Welche Anforderungen, Aspekte, Hemmnisse oder Vorteile für die Einführung einer neuen Antriebstechnologie im ÖPNV (wie z.B. Wasserstoff) sind aus Ihrer Sicht vorhanden und sollten berücksichtigt werden? «

Für den Einsatz von Wasserstoff als Energieträger im ÖPNV wird als zentrale Anforderung die Reduktion von Treibhausgasen entlang der gesamten Kraftstoffkette gesehen. Daraus abgeleitet ergibt sich die Forderung, dass die Erzeugung von Wasserstoff (zusätzlich zum ohnehin vorhandenen Nebenprodukt-Wasserstoff) auch in einer frühen Marktphase ausschließlich mittels Elektrolyse auf Basis erneuerbarer Energien erfolgen darf. Eine mögliche Erzeugung mittels Strom aus fossilen Kraftwerken oder über Alternativverfahren, wie etwa der Methan-Dampfreformierung,

sollten selbst als Brückentechnologie nicht eingesetzt werden, da die CO₂-Einsparungsziele der Bundesregierung auf diese Weise ad absurdum geführt würden. Die Nutzung bereits heute anfallenden Wasserstoffs als Nebenprodukt der Industrie ist hiervon ausgenommen und wird ebenfalls befürwortet.

Erhebung weiterer relevanter
Randbedingungen (AP4)

Aus Sicht der Busbetreiber ist die wichtigste Anforderung an den Einsatz von Brennstoffzellenbussen im ÖPNV die Verfügbarkeit der Technologie. Damit ist einerseits die Verfügbarkeit geeigneter Fahrzeugmodelle am Markt gemeint sowie andererseits die Zuverlässigkeit beschaffter Modelle im täglichen Einsatz. Momentan ist der Fahrzeugmarkt auf wenige Hersteller und Modelle beschränkt (siehe Kapitel 2), sodass eine zeitnahe Beschaffung größerer Stückzahlen schwierig ist. Zur tatsächlichen Verfügbarkeit der Fahrzeuge im Alltag gibt es bislang keine Informationen; die derzeit auf der Strecke Cuxhaven-Bremerhaven im Probetrieb eingesetzten BZ-Züge der Firma Alstom kommen auf eine Verfügbarkeit von 98 %, was der Verfügbarkeit konventionell angetriebener Busse entspricht.

Die im Projekt beteiligten assoziierten Partner VAG und SBG sind vergleichsweise große Busbetreiber mit jeweils rund 50 bis 70 Fahrzeugen, wie sie in Großstädten oder Ballungsräumen häufig zu finden sind. Gleichzeitig gibt es jedoch bundesweit eine Vielzahl kleiner privater Busbetreiber mit teils weniger als 10 Fahrzeugen, die zudem sowohl im ÖPNV als auch im Reiseverkehr tätig sind. Aufgrund der derzeit hohen Mehrkosten bei der Anschaffung von Batterie- oder BZ-Bussen sowie der zugehörigen Lade- bzw. Tankinfrastruktur ist eine Umstellung solch kleiner Flotten derzeit kaum rentabel darstellbar. Für diese Unternehmen ist deshalb die Verfügbarkeit einer öffentlichen H₂-Tankstelleninfrastruktur (oder Ladestationen) gerade im ländlichen Raum notwendig. Bei der Ausschreibung des Busbetriebs sollte dies berücksichtigt werden.

Die Anschaffung von Bussen mit alternativen Antrieben wird derzeit vor allem durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) gefördert. Dabei werden aktuell die Mehrkosten gegenüber einem vergleichbaren Dieselbus in voller Höhe gefördert, was unmittelbar nach Einführung dieser Förderung eine deutliche Preissteigerung von Batterie- und BZ-Bussen nach sich zog. Hier kann durchaus von Mitnahmeeffekten der Fahrzeughersteller gesprochen werden. Einhellige Meinung aller Teilnehmer*Innen des Workshops ist, dass eine Investitionsförderung durchaus notwendig und wünschenswert sei. Allerdings sollte diese möglichst zielgerichtet und womöglich auch gedeckelt sein, analog zur Förderung von Batterie-PKW, die nur für Fahrzeuge unterhalb einer gewissen Anschaffungspreisgrenze gewährt wird. Dadurch könnte sich eine Preisbereinigung ergeben, die, ergänzt durch zusätzlich auf den Markt drängende Hersteller und Modelle, zu einer deutlichen Senkung der Anschaffungskosten von BZ- und Batteriebussen beitragen kann.

Die Teilnehmer*Innen weisen zusätzlich darauf hin, dass bei der Anschaffung von Bussen mit neuartiger Antriebstechnik und der zugehörigen Infrastruktur stets auch der übrige Verkehrssektor der Region berücksichtigt werden sollte. Angefangen bei Lärmaktionsplänen oder Mobilitätskonzepten der Region sollte zudem interkommunal geprüft werden, wo sich gemeinsame Vorteile ausnutzen lassen. Auf diese Weise werden eine einfachere Realisierung sowie geringere spezifische Kosten erwartet.

Ein weiterer Aspekt bei der Umstellung von Dieselbussen auf Batterie- oder BZ-Antriebe könnte sich durch die längere Lebensdauer solcher Fahrzeuge ergeben. Werden Dieselbusse derzeit etwa 12 bis 14 Jahre lang betrieben, denkt die VAG bereits heute darüber nach die jetzt und künftig beschafften Batteriefahrzeuge rund 16-18 Jahre lang zu betreiben. Hintergrund ist, dass nach rund 8-9 Jahren die Batteriepacks der Busse getauscht werden müssen und nach 16-18 Jahren somit das zweite Batteriepack

das Ende seiner Lebensdauer erreicht hätte. Nach heutigem Kenntnisstand würden die Busse anschließend verschrottet, da ein Gebrauchtmkt, wie er derzeit für Dieselbusse existiert, momentan nicht in Sicht ist.

Aufgrund der größeren Investitionskosten für Busse mit alternativem Antrieb werden sich zudem die Abschreibungszeiträume (derzeit 8-9 Jahre) tendenziell erhöhen. Im Gegenzug bleibt der Ausschreibungszeitraum der Verkehrsdienstleistung von derzeit 10 Jahren bislang unverändert, was für die Busbetreiber ein größeres finanzielles Risiko bedeutet. Es besteht also die Möglichkeit, dass die Investition in das Fahrzeug nach Ende der Vertragslaufzeit für die Erbringung der Verkehrsdienstleistung noch nicht abgeschrieben ist. Dieses zusätzliche Risiko werden Busbetreiber in diesem Fall in ihr Angebot einkalkulieren, was steigende Kosten für den ÖPNV nach sich ziehen könnte. Weitere Kosten für die Busbetreiber können gerade in der Übergangsphase von Diesel auf Alternativantriebe entstehen. Durch den parallelen Betrieb von mindestens zwei Technologien muss doppelte Infrastruktur vorgehalten und betrieben werden. Diese vorübergehenden Mehrkosten in der Umstellungsphase werden bislang nicht gefördert sondern gehen zu Lasten der Busbetreiber.

Ein Teilnehmer des Workshops berichtet zudem von Erfahrungen mit Behörden während der Genehmigungsphase für den Neubau einer H₂-Tankstelle für Busse in einer baden-württembergischen Großstadt. Aufgrund nicht vorhandener Erfahrungen hatten die Mitarbeiter*Innen der zuständigen Behörden dort nur sehr wenig Fachwissen zu Wasserstofftankstelle. Dies hat zu einer erheblichen Verlängerung des Genehmigungsprozesses geführt. Durch gezielte Schulung von Mitarbeiter*Innen sollte die öffentliche Verwaltung dieses Problem künftig adressieren. Für eine zügige Projektrealisierung sollten zudem Zuständigkeiten klar geregelt werden, was bislang noch nicht der Fall zu sein scheint.

Als großer Vorteil für die Einführung von H₂ einer neuen Antriebstechnologie im ÖPNV wird die derzeit stark an Zulauf gewinnende Klimabewegung „Fridays for Future“ gesehen. Mit dieser geht verstärkt die Erkenntnis einher, dass der ÖPNV einen wichtigen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen leisten kann und auch weitere Luftschadstoffemissionen (z.B. Stickstoffdioxid) reduziert werden können. Die Zustimmung für größere Investitionen und neue Technologien im ÖPNV wird daher derzeit als hoch angesehen.

Erhebung weiterer relevanter Randbedingungen (AP4)



Abb. 20 Ergebnisse während des Workshops

5.2 Nutzung von Synergieeffekte zwischen Wasserstoffbussen und anderen Technologien

» Welche Synergieeffekte von Wasserstofftechnologien mit anderen Technologien gibt es aus Ihrer Sicht und wie könnten diese genutzt werden? Welche Akteure inner- und außerhalb Freiburgs können hier eine Rolle spielen? «

Die Teilnehmer*Innen des Workshops sind sich darin einig, dass Wasserstofftechnologien eine entscheidende Rolle im Energiesystem spielen werden. Gerade die Nutzung aller denkbaren Synergieeffekte kann einen erheblichen Nutzen mit sich bringen, sowohl technisch als auch ökonomisch. Bei der Planung von Wasserstoffkonzepten sollten daher aktiv Synergien gesucht und sich ergebende Synergieeffekte bestmöglich genutzt werden. Andernfalls bestünde die Gefahr, dass sich der wirtschaftliche Einsatz von Wasserstofftechnologien nur verspätet realisieren lässt.

Im Laufe des Workshops wurden verschiedene sinnvolle Synergien zwischen der im Projekt betrachteten H₂-Infrastruktur für Omnibusse im ÖPNV und weiteren Anwendungsfeldern von Wasserstoff vorgeschlagen. So wird der Einsatz von Wasserstoff in der Mobilität auch im Bereich des Straßenschwerlastverkehrs mit LKW sowie auf nicht-elektrifizierten Strecken im Schienenverkehr erwartet. Von Vorteil ist dabei, dass die Betankung sowohl von Bussen als auch von Zügen mit gasförmigem Wasserstoff unter Hochdruck von 350 bar erfolgt. Somit ließe sich die erforderliche Infrastruktur bei geschickter Wahl der Tankstellenstandorte intermodal einsetzen und auf diese Weise die spezifischen Kosten reduzieren.

Darüber hinaus könnte Wasserstoff nicht nur als Kraftstoff genutzt, sondern auch in das vorhandene Erdgasnetz beigemischt und damit dem Wärmesektor zugeführt werden. In der Wissenschaft wird diese Anwendung in einer späteren Phase der Energiewende gesehen.

Sofern der Elektrolyseur zur Wasserstofferzeugung mittels kurzzeitig verfügbaren überschüssigen regionalen Stroms aus erneuerbaren Energien betrieben wird, könnte Wasserstoff zusätzlich als eine Art Energiespeicher bzw. –senke im Stromnetz dienen und dort einen wirtschaftlichen Nutzen darstellen.

Um Synergien nutzen zu können, ist es eine Grundvoraussetzung, dass unterschiedliche Akteure von den Aktivitäten der jeweils anderen wissen. Um den Austausch von Informationen zu erleichtern und besser zu kanalisieren, schlug eine Teilnehmerin die Einrichtung eines regelmäßigen „Wasserstoff-Stammtischs“ im Großraum Freiburg vor. Dort könnten in unverbindlicher Atmosphäre Personen mit Interesse an Wasserstofftechnologien zusammenkommen und auf diese Weise mögliche Synergien zur gemeinsamen Nutzung von H₂-Erzeugungsanlagen und –infrastruktur frühzeitig erkannt und zielgerichtet ausgebaut werden.

Um eine Vielzahl von Akteuren in der Region miteinander ins Gespräch zu bringen, wurde zudem die Veranstaltung eines Kongresses zum Thema Wasserstofftechnologien vorgeschlagen. Dessen Ziel sollte es sein, die derzeit noch spürbare Zögerlichkeit von Entscheidungsträger*Innen in allen Energiesektoren zu überwinden und so das sogenannte Henne-Ei-Problem zu durchbrechen.

Auch die Teilnahme des Großraums Freiburg an den momentan durch die NOW ausgeschriebenen HyLand-Förderungen wurde angeregt.

Ganz konkret wurde vorgeschlagen, die Industrie- und Handelskammer Freiburg sowie den größten lokalen Energieversorger Badenova in künftige Aktivitäten mit einzubeziehen. Beide verfügen über gute Kontakte zu einer Vielzahl von Akteuren und könnten hier eine Schnittstelle bilden. Die Badenova betreibt zudem sowohl Gas- als

auch Stromnetze in Südbaden und verfolgt damit bereits heute einen intersektoralen Ansatz, wie er für Wasserstofftechnologien als zentral angesehen wird. Zusätzlich existiert seitens der städtischen Eigenbetriebe bereits das sogenannte „Freiburger Energienetzwerk“, in dem sich die dort organisierten Unternehmen (darunter z.B. auch die VAG) zu Themen aus dem Energiebereich austauschen.

Erhebung weiterer relevanter
Randbedingungen (AP4)

Für künftige Entwicklungen ist es denkbar, weitere Akteure, wie etwa Taxiunternehmen, weitere regionale Energieversorger, Logistikunternehmen (z.B. DHL Logistik in Herbolzheim, Dachser) und Unternehmen mit eigenem Fuhrpark (z.B. Schwarzwaldmilch, Großhandelsunternehmen) in künftige Überlegungen einzubeziehen und gezielt anzusprechen. Auch der Durchgangsverkehr sowohl auf der A5 als auch der B31 von Freiburg in Richtung Schwarzwald könnte zu einer höheren Auslastung vorhandener H2-Tankstellen in einer frühen Marktphase beitragen und sollte bei der Planung möglicher Projekte nicht vernachlässigt werden.

Grundsätzlich sollte bei der (vermeintlichen) Nutzung von Synergien genau darauf geschaut werden, ob sich ein erwarteter Mehrnutzen auch tatsächlich realisieren lässt. Nur, wenn durch die Nutzung von Synergien nicht neue Probleme entstehen oder gar der eigentliche Nutzen minimiert wird, kann von einer echten Bereicherung und einem Zugewinn für alle beteiligten Akteure gesprochen werden.

5.3 Akzeptanz von Wasserstoff im ÖPNV

» *Wie bewerten Sie die Akzeptanz bei einer Einführung von Wasserstoff im ÖPNV, bspw. im Vergleich zu Batterieantrieben oder konventionellen Antrieben? Welche Chancen und Risiken sehen Sie?* «

Die Akzeptanz von Wasserstoff als Energieträger im ÖPNV wurde im Workshop vielseitig diskutiert.

So gab es Stimmen, dass die Bedeutung der Akzeptanz neuartiger Antriebe durch Fahrgäste eher überschätzt werde und diese vor allem an einem pünktlichen sowie preisgünstigen ÖPNV interessiert seien. Mit welcher Antriebstechnologie ein Omnibus ausgerüstet ist, sei für die allermeisten Fahrgäste allenfalls von untergeordneter Bedeutung.

Im Laufe der Diskussion wurde die Sorge geäußert, dass künftig die Sicherheit von Wasserstoffbussen sowie der zugehörigen Infrastruktur infrage gestellt werden könnte. Da einige Teilnehmer*Innen bereits Erfahrungen mit kritischen Rückfragen von fachfremden Personen gemacht haben, wird eine proaktive Kommunikation zur Sicherheit der Technologie vorgeschlagen.

Unterstützt durch die stark in den Fokus der Öffentlichkeit gerückte Klimaschutzbewegung "Fridays For Future" sehen einige Teilnehmer*Innen einen sehr günstigen Zeitpunkt für die Einführung einer neuen Antriebstechnologie im ÖPNV. Es besteht die Hoffnung, dass diese weniger skeptisch gesehen wird und die Vorteile stärker in den Vordergrund rücken.

Alle Teilnehmer*Innen waren sich darin einig, dass eine aufkommende Wasserstoffinfrastruktur auch in der frühen Marktphase bereits vollständig auf Basis erneuerbarer Energien gedacht und geplant werden sollte. Eine Zwischenlösung über die Nutzung von grauem Wasserstoff auf Basis von Kohlenstoffverbindungen wird als kritisch gesehen und könnte die Akzeptanz der Technologie hemmen. Darüber hinaus bestand Einigkeit darüber, dass Omnibusse und allgemein öffentlicher Personennahverkehr grundsätzlich, also auch mit noch fossilen Antrieben, zu einer erheblichen Verbesserung der Verkehrs-, Schadstoff-, und Lärmsituation in Ballungsräumen beitragen. Durch eine konsequente Umstellung auf batterie- und brennstoffzellenelektrische Antriebe kann und sollte dieser Vorteil rasch weiter ausgebaut werden.

5.4 Zwischenfazit zu sonstigen Randbedingungen

Erhebung weiterer relevanter
Randbedingungen (AP4)

Die Teilnehmer*Innen des Workshops sehen Wasserstoff als Kraftstoff im ÖPNV grundsätzlich positiv. Gerade gegenüber herkömmlichen Dieselbussen zeichnen sich Busse mit Brennstoffzellenantrieb durch lokale Emissionsfreiheit, geringe Geräuschemissionen und zugleich vergleichsweise große Reichweiten aus. Gerade im Betrieb von Omnibussen, die auf längeren Umläufen eingesetzt werden, kommt dieser Vorteil gegenüber rein batterieelektrischen Bussen zum Tragen.

Unter anderem als ein Ergebnis dieses Arbeitspakets erfolgt die Wasserstoffherzeugung der in Kapitel 7 definierten und bewerteten Konzepte überwiegend aus erneuerbaren Quellen. Der Wasserstoff wird dabei mittels Elektrolyse unter Verwendung von regenerativem Strom erzeugt. Als Vergleich / Benchmark werden zusätzlich Konzepte unter Verwendung von grauem Wasserstoff auf Basis fossiler Energieträger betrachtet.

Ein weiteres Ergebnis dieses Workshops ist der Wunsch nach einer kosteneffizienten Nutzung künftiger Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg. Dies gilt sowohl für Wasserstoffherzeugungsanlagen und –tankstellen als auch die dazwischenliegende Logistik, z.B. in Form von Trailern. Ein möglicher Weg zur Senkung der spezifischen Kosten ist eine von mehreren Akteuren (z.B. Busunternehmen, Taxiunternehmen, Flottenbetreiber) gemeinsam genutzte Infrastruktur. Durch die größere Auslegung können zum einen Skaleneffekte genutzt werden, welche die spezifischen Errichtungskosten reduzieren und zum anderen eine hohe Auslastung der Infrastruktur gewährleistet werden, was zusätzlich die spezifischen Betriebskosten verringert. Beides führt somit zu einer möglich kosteneffizienten Wasserstoffversorgung. In der Konzepterstellung werden daher Konzepte betrachtet, in denen die Wasserstoffinfrastruktur ganz oder teilweise von mehreren Akteuren geteilt wird.

6

Synthese: Erhebung des Potenzials für Wasserstoff im ÖPNV im Großraum Freiburg (AP5)

Synthese: Erhebung des Potenzials für Wasserstoff im ÖPNV im Großraum Freiburg (AP5)

Auf Basis der durch die Partner bereitgestellten Daten, wird in diesem Kapitel die Synthese der Daten zur Erhebung des maximalen Potenzials für Wasserstoff im ÖPNV im Großraum Freiburg beschrieben.

In diesem Projekt werden die Daten aller Umläufe berücksichtigt, die durch die Partner SBG und VAG für den Großraum Freiburg zur Verfügung gestellt wurden. Die VAG hat Informationen zu allen durch sie betriebenen Umläufen bereitgestellt, die SBG Daten zu 242 Umläufen im Großraum Freiburg. Die Karte in Abb. 21 zeigt die unterschiedlichen Abstellorte der Omnibusse inkl. der Anzahl der dort stationierten Fahrzeuge sowie zusätzlich eine Auswahl von Umläufen der SBG im Großraum Freiburg. Ca. 25 der in Freiburg stationierten Fahrzeuge werden durch die SBG betrieben. Es ist zu beachten, dass die Anzahl der Umläufe teils deutlich größer ist, als die Anzahl der Busse.

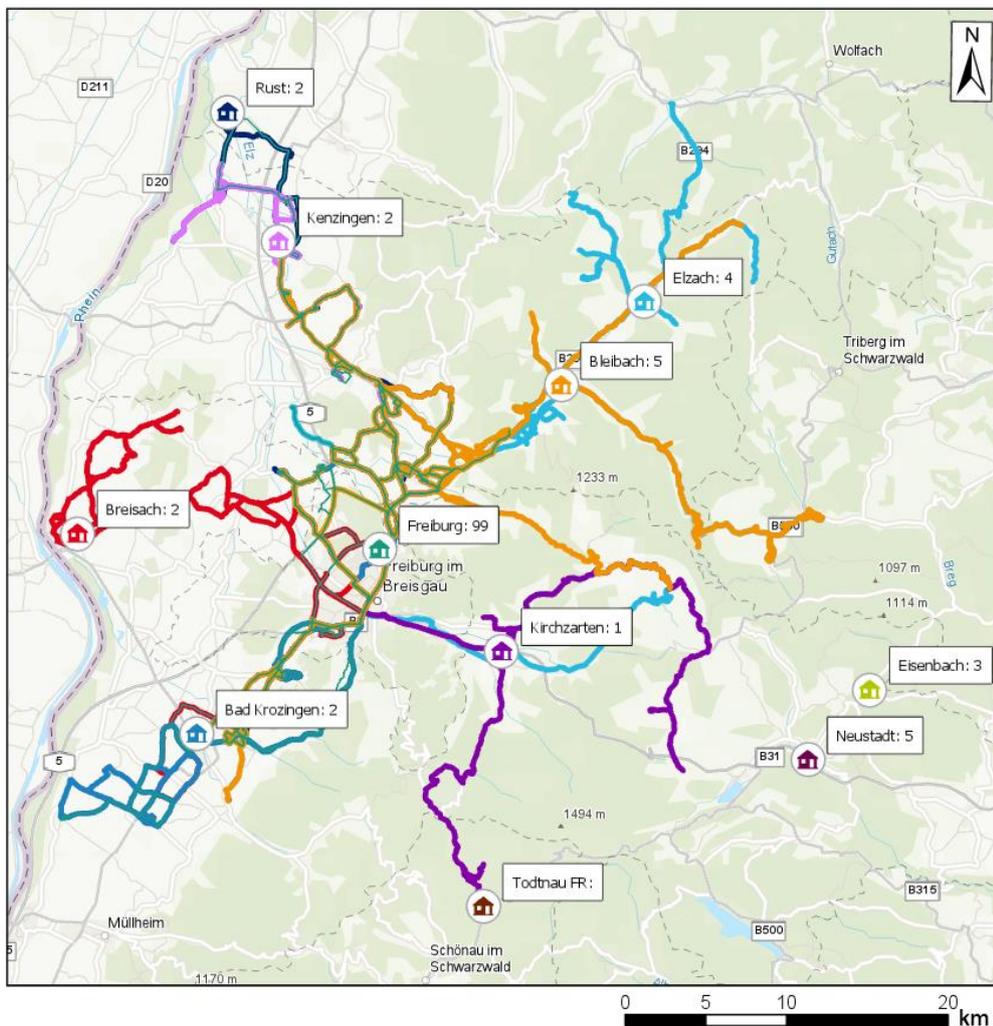


Abb. 21 Abstellorte im Großraum Freiburg inkl. der Anzahl stationierter Busse sowie Auswahl an SBG-Umläufen

Aufgrund der großen Datenmenge wird nur ein Teil der Umläufe mit Hilfe des nachfolgend beschriebenen GIS-/Python-Tools ausgewertet. Konkret wurden alle Umläufe der VAG und knapp jeder fünfte Umlauf der SBG ausgewertet.

Bei der SBG wurden in Abhängigkeit des Wochentags sowie von Schulferien repräsentative Umläufe ausgewählt. So gibt es für die gleiche Strecke häufig einen Umlauf für die Wochentage Montag bis Donnerstag zu Schulzeiten, einen zweiten für den Freitag zu Schulzeiten, einen dritten am Samstag zu Schulzeiten und einen vierten Umlauf an Sonntagen zu Schulzeiten. Zusätzlich existieren die gleichen Umläufe noch einmal zu Ferienzeiten, sodass sich bis zu 8 Umläufe mit einer teils nahezu gleichen Streckenführung ergeben. Die Umläufe unterscheiden sich häufig in der Anzahl angefahrener Haltestellen sowie in der Umlauflänge. Insbesondere an Wochenenden und zu Ferienzeiten werden teils Haltestellen ausgelassen oder manche Teilstrecken nicht befahren, wodurch sich die Umläufe verkürzen können.

In einem ersten Schritt wurden daher Umläufe mit nahezu gleicher Streckenführung identifiziert und anhand der Umlauflänge sortiert. Anschließend wurde der jeweils längste Umlauf für die Bewertung mit Hilfe des GIS-/Python-Tools ausgewählt. Dies führt dazu, dass mit Hilfe des Tools tendenziell vor allem längere Umläufe der SBG bewertet werden und kürzere Umläufe unterrepräsentiert sind. Dies begünstigt ein höheres Potenzial von Wasserstoffbussen, was zunächst nach einer Verzerrung der Ergebnisse aussieht. Da jedoch unabhängig von Wochentagen oder Ferienzeiten in der Regel die gleichen Fahrzeuge eingesetzt werden (das Vorhalten zusätzlicher Busse für Tage mit kürzeren Umläufen scheint ökonomisch und betrieblich unsinnig), handelt es sich bei dieser Methode um einen validen Ansatz.

In Kapitel 6.3 wird ein Fazit der Potenzialerhebung gezogen und das maximale Potenzial für Wasserstoffbusse im Großraum Freiburg abgeleitet.

6.1 Randbedingungen und Annahmen

Die für die Auswertung verwendeten Parameter gehen aus einem Expertengespräch am 17.10.2019 mit den Busbetreibern hervor.

Bei einer Steigung von 0-2 % werden keine Auswirkung auf die Reichweite angenommen. Liegt eine Steigung von 2-8 % bzw. mehr als 8 % vor, so verringert sich die Reichweite um 15 bzw. 23 %. Ebenso wird die Reichweite durch die Verwendung einer Heizung um 50 % bzw. Klimaanlage um 30 % verkürzt. Busunternehmen verwenden außerdem 15 % der Reichweite eines Busses als Puffer, weshalb dieser bei jedem der vier Bustypen unterschiedlich ist. Der Puffer beschreibt eine zusätzliche Anzahl an Kilometern, die für einen möglichen Mehrenergieaufwand (Stau, Umleitung, etc.) hinzugerechnet wird. Die Werte des Puffers für die einzelnen Fahrzeuge und die weiteren Einflüsse werden in Tab. 05 aufgeführt.

| Mehrverbrauch | Bat (OC) | Bat (ON) | BZ | BZ-REX | Einheit |
|-------------------|----------|----------|------|--------|---------|
| Steigung 0...2 % | 0 | 0 | 0 | 0 | % |
| Steigung 2...8 % | 3 | 5 | 13 | 13 | % |
| Steigung > 8 % | 10 | 13 | 23 | 23 | % |
| Klimaanlage | 28 | 30 | 30 | 30 | % |
| Heizung | 48 | 50 | 50 | 50 | % |
| Sicherheitspuffer | 22,5 | 37,5 | 52,5 | 67,5 | km |
| Reichweite | 150 | 250 | 350 | 450 | km |

Tab. 05 Eingangsparameter für die Bewertung der Umläufe

Es wurden in dieser Betrachtung keine streckenspezifischen Einflussfaktoren berücksichtigt. Stattdessen wurden für alle Umläufe / Strecken alle Einflussfaktoren (Steigungen, Klimaanlage / Heizung) einmal angewendet und die Eignung berechnet.

Damit ergibt sich in den Ergebnissen eine Worst-Case-Abschätzung.

Bei Batteriebussen mit Gelegenheitsladung ist zu beachten, dass für die hier durchgeführte Betrachtung keine Laden des Fahrzeuges im Laufe des Tages berücksichtigt wurde, obwohl gerade dies den großen Vorteil dieser Technologie ausmacht. Würden solche Zwischenladungen im Verlauf des Tages berücksichtigt, so hat ein Bat (OC)-Bus theoretisch eine unendliche Reichweite, solange er immer rechtzeitig an einer Station laden kann. Bei innerstädtischen Umläufen, in denen häufig der gleiche Ort passiert wird, ist dies möglich, da nur eine geringe Anzahl Pantographlader erforderlich wäre. Insbesondere bei Umläufen im Umland wäre eine hohe Anzahl Pantographlader erforderlich, weshalb der Einsatz von Bat (OC)-Bussen zwar aus technischer Sicht grundsätzlich möglich, aber aus ökonomischer Perspektive womöglich nicht zielführend ist.

Die Möglichkeit einer Zwischenladung mittels Pantograph im Laufe des Tages wird daher erst zu bei der Auswertung der nachfolgenden technischen Betrachtung qualitativ berücksichtigt.

Synthese: Erhebung des
Potenzials für Wasserstoff im
ÖPNV im Großraum Freiburg
(AP5)

6.2 Ergebnisse der GIS-Analyse und Python-Berechnung (AP2)

Nach dem Einlesen und Verarbeiten der Daten der VAG in ArcGIS wird ein Liniennetz erkennbar, das in Abb. 22 dargestellt ist. Es ist zu erkennen, dass die meisten Linien in oder in der näheren Umgebung von Freiburg verlaufen und kaum Steigungen besitzen. Bei den Linien in der Karte handelt es sich alleinig um die Linien, nicht um die Umläufe. Für die Berechnung werden diese Linien mit Hilfe von Umlaufplänen zu Umläufen zusammengeführt. Dabei entstehen insgesamt 41 Umläufe, die eine Länge zwischen 32,9 und 271,2 km aufweisen.

Synthese: Erhebung des Potenzials für Wasserstoff im ÖPNV im Großraum Freiburg (AP5)

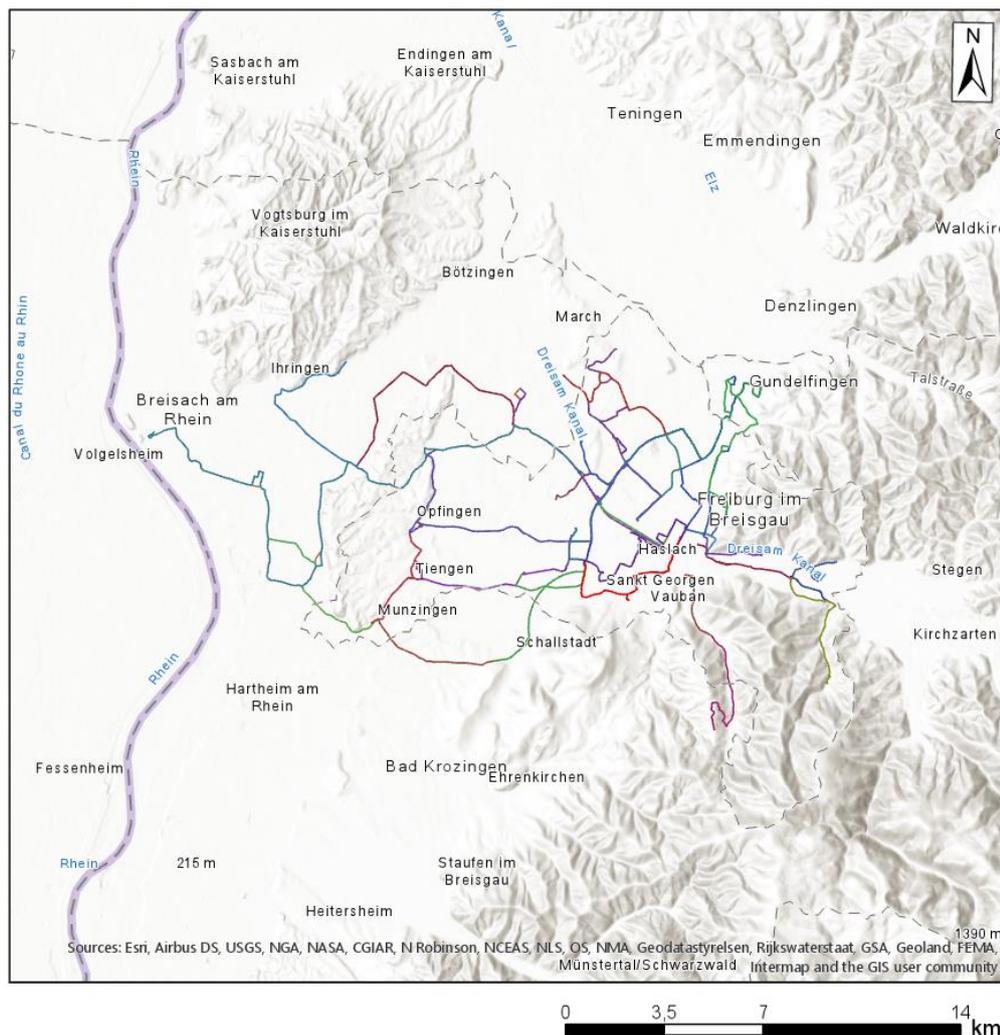


Abb. 22 Buslinien der VAG im Großraum Freiburg

Auch für die Daten der SBG entsteht ein Netz der 36 Umläufe, wie es in Abb. 23 zu sehen ist. Diese haben Längen bis 260 km und führen teilweise über den Kaiserstuhl bzw. in den Schwarzwald hinein. Das bedeutet, dass diese Umläufe Steigungen bis über 8 % besitzen. Auch weitere Strecken bis nach Rust, Haslach im Kinzigtal, Todtnau, Hinterzarten und Furtwangen sind aufzufinden. Der Umlauf mit der geringsten Länge ist 60,6 km lang.

 Synthese: Erhebung des
 Potenzials für Wasserstoff im
 ÖPNV im Großraum Freiburg
 (AP5)

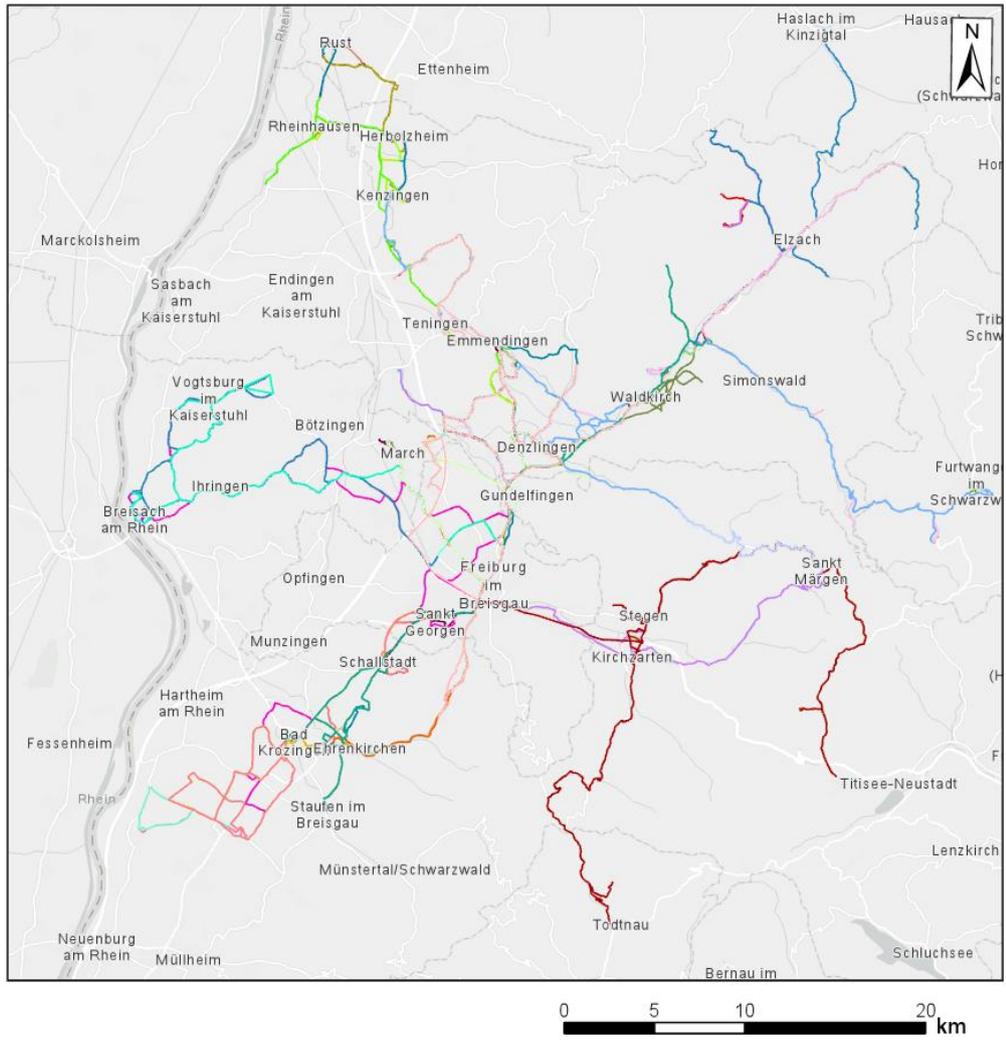


Abb. 23 Umläufe der SBG im Großraum Freiburg

Werden diese Linien- und Umlaufnetze zusammengefasst und die Reliefkarte darunter gelegt, ergibt sich eine Karte wie sie in Abb. 24 zu sehen ist. Mit diesen Linien und Umläufen ist der größte Teil der Fläche des Untersuchungsgebietes abgedeckt.

Synthese: Erhebung des Potenzials für Wasserstoff im ÖPNV im Großraum Freiburg (AP5)

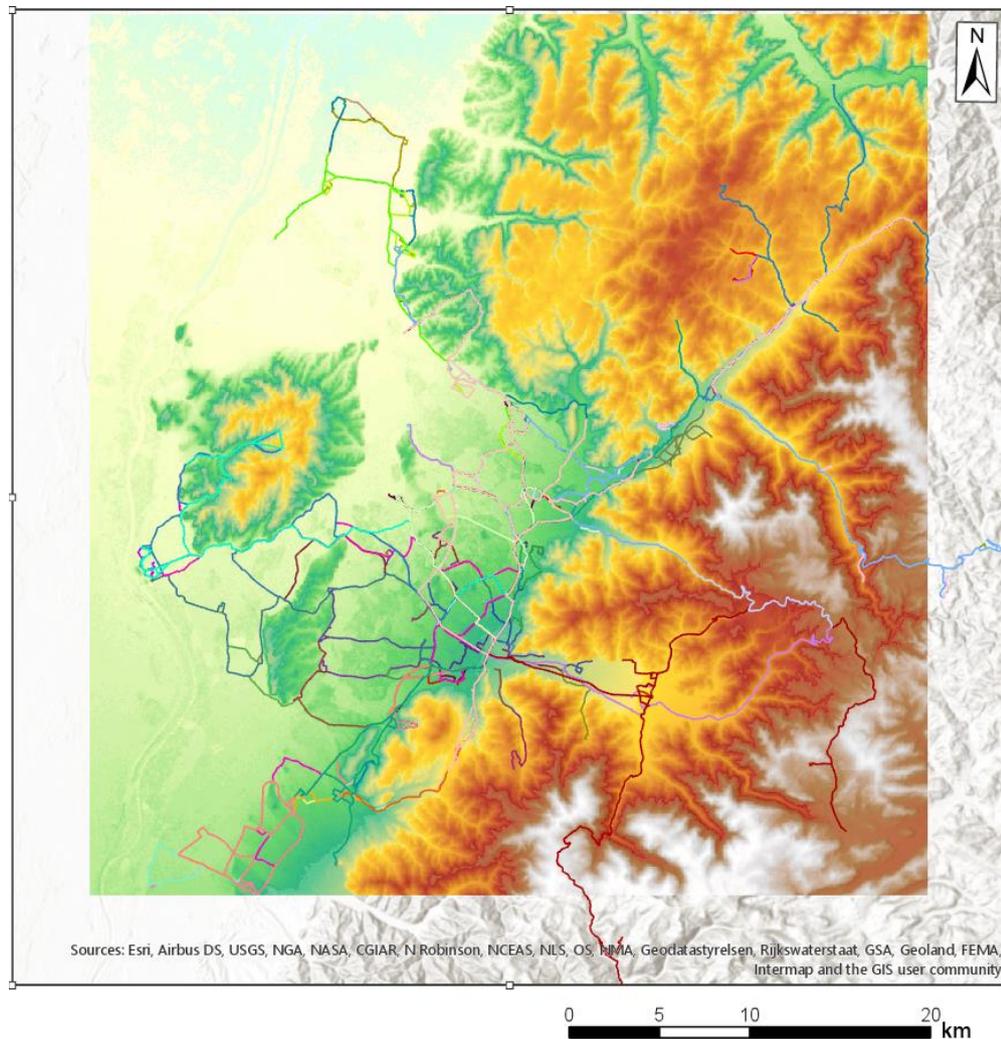


Abb. 24 Zusammenfassung aller Linien und Umläufe der VAG und SBG im Großraum Freiburg

Für die Auswertung mit Python werden nun alle vorhandenen Umläufe der VAG und SBG nacheinander in das Auswertungstool eingelesen. Dabei wird für jeden Umlauf entschieden, wie hoch die durchschnittliche Steigung ist. Die Ergebnisse werden in einzelnen Dateien gespeichert und am Ende jeweils für die VAG und SBG in eine einzige Liste zusammengeführt. Aus den Werten der Berechnungen werden Diagramme für die VAG und SBG dargestellt.

6.2.1 VAG

Die Eignung eines Buses mit Batterie oder Brennstoffzelle hängt stark abhängig von der zu fahrenden Strecke. In diesem Kapitel erfolgt eine Bewertung der Umläufe von der VAG und der SBG für die folgenden Antriebssysteme:

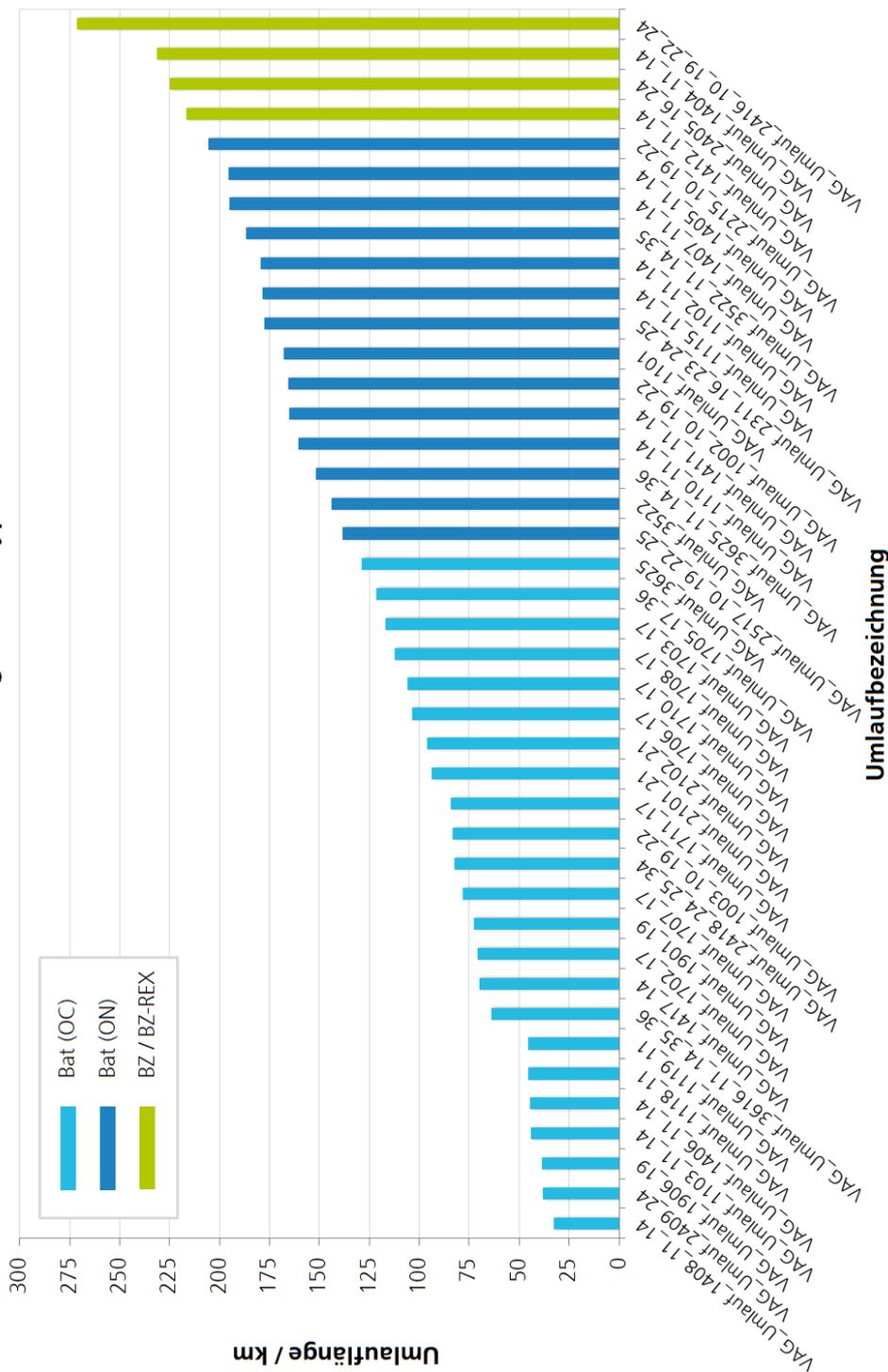
- Batteriebus mit Opportunity Charging (OC)
- Batteriebus mit Overnight Charging (ON)
- Brennstoffzellenbus (BZ)
- Batteriebus mit Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-REX)

Die Eignung der Antriebssysteme ist im Wesentlichen von der Umlauflänge einer Linie abhängig. Für die Analyse wird davon ausgegangen, dass die Buse mit komplett aufgeladener Batterie bzw. vollem Wasserstofftank das Depot verlassen und danach dieses wieder anfahren, um die Batterie wieder aufladen oder Wasserstoff zu tanken. In Abb. 25 sind die Linien der VAG und deren Umlauflänge dargestellt. Der kürzeste Umlauf beträgt hier rund 30 km, der längste weist eine Strecklänge von rund 270 km auf. Die blauen Balken stellen in dieser Abbildung Strecken dar, die mit Batteriebusen abgedeckt werden können, die ihre Batterien mit Pantographen oder ähnlichem an Haltestellen aufladen (OC). Längere Strecken eignen sich aufgrund der limitierten Batteriekapazität nicht. Bei den dunkelblauen Balken handelt es sich um Linien, die mit Batteriebusen befahren werden können, die über Nacht geladen werden (ON) und in der Regel eine größere Batterie aufweisen und somit etwas größere Distanzen zurücklegen können.

Bei noch großen Distanzen kommen nur Busse in Frage, die mit einer Brennstoffzelle ausgestattet sind (hellgrüner Balken) oder die zusätzlich über eine Brennstoffzelle als Range-Extender verfügen. Diese Bustypen haben in der Regel höhere Reichweiten und können Strecken mit höheren Distanzen befahren.

Synthese: Erhebung des
Potenzials für Wasserstoff im
ÖPNV im Großraum Freiburg
(AP5)

Umläufe der VAG mit Einteilung der Bustypen ohne Einflüsse



Synthese: Erhebung des Potenzials für Wasserstoff im ÖPNV im Großraum Freiburg (AP5)

Abb. 25 Ergebnis der Potenzialanalyse – Umläufe der VAG (ohne Einfluss von Klima/Heizung)

Hoher Außentemperaturen in den Sommermonaten erfordern eine aktive Klimatisierung des Bus-Inneren mit einer Klimaanlage. Der Betrieb einer Klimaanlage ist ebenfalls sehr energieintensiv und reduziert die Reichweite von Batterie- und Brennstoffzellenbusse. In Abb. 26 ist die Eignung der verschiedenen Bustypen für die Umläufe bei erforderlicher Klimatisierung dargestellt. Der Graphik kann entnommen werden, dass die Klimatisierung die Reichweite im Vergleich zum Idealfall deutlich einschränkt, jedoch weniger stark im Vergleich zu Zeiten mit Heizbedarf. Dennoch reduziert sich die theoretische Reichweite der Batteriebusse mit Opportunity Charging von rund 130 auf knapp 95 km. Für Batteriebusse mit Overnight-Charging reduziert

sich die Reichweite von 205 km auf 160 km. In Folge dessen müssen vermehrt Umläufe mit Brennstoffzellen-Busse abgedeckt werden. Für den längsten Umlauf ist hier ein Bus mit Brennstoffzellen-Range-Extender erforderlich, um die erforderliche Reichweite zu erreichen.

Synthese: Erhebung des Potenzials für Wasserstoff im ÖPNV im Großraum Freiburg (AP5)

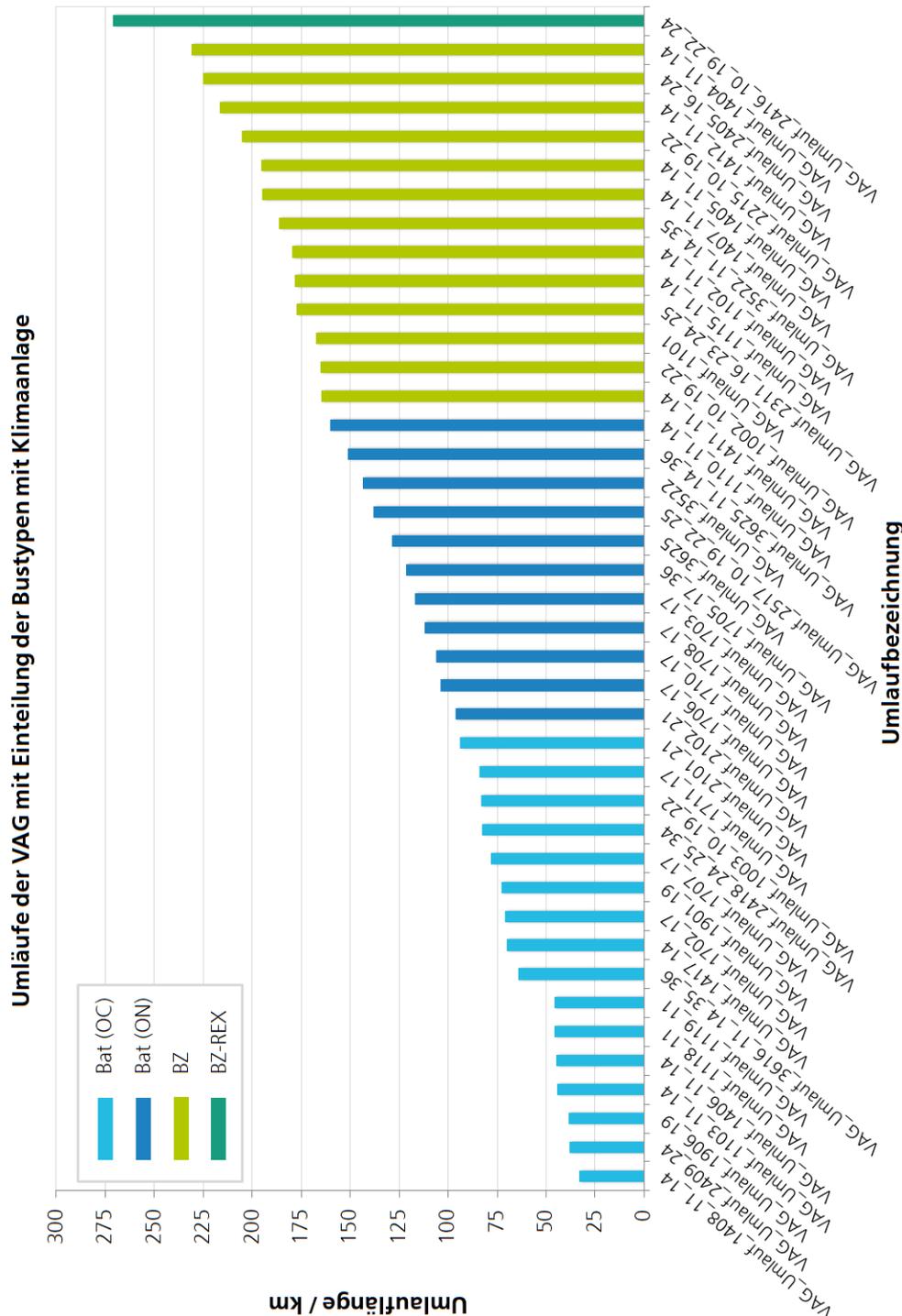


Abb. 26 Ergebnis der Potenzialanalyse – Umläufe der VAG (mit Einfluss von Klima)

In der Diskussion um Batterie betriebene Busse wird immer wieder der höhere Energiebedarf der Busse in den Wintermonaten diskutiert, da die Busse für eine komfortable Fahrt geheizt werden müssen. Bei Bussen mit Diesel-Verbrennungsmotoren kann die Abwärme des Motors genutzt werden, wobei auch hier häufig mit Heizöl betriebene Brenner eingesetzt werden. Diese Möglichkeit entfällt

bei Batteriebussen. Batteriebusse müssen den Innenraum aktiv beheizen und nutzen hierfür elektrische Energie aus den Batterien. Dies reduziert jedoch die Reichweite. Abb. 27 zeigt die Eignung der verschiedenen Bustypen für die Buslinien für die Wintermonate. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Anzahl der Linien, die mit einem Batteriebus mit Opportunity Charging (OC) ausgestattet sind, von zuvor 23 auf nun 15 reduziert. Die theoretische Reichweite sinkt von rund 125 km auf knapp 85 km. Auch für Batterie-Busse mit Overnight Charging sinkt die mögliche Reichweite in den Wintermonaten von 250 km auf rund 140 km. Der Anteil der Umläufe, die in den Wintermonaten nur mit Brennstoffzellenbussen oder Bussen mit einem Brennstoffzellen-Range-Extender befahren werden kann steigt dadurch deutlich an, jedoch sinkt auch hier die mögliche Reichweite. Der grau-grün schraffierte Umlauf kann auch mit einem Brennstoffzellen-Bus nicht befahren werden, da die Distanz zu hoch ist. Jedoch ist es denkbar, diesen Umlauf im Rahmen einer Linienumstellung zu verkürzen und folgend für Brennstoffzellen-Busse befahrbar zu machen.

 Synthese: Erhebung des
 Potenzials für Wasserstoff im
 ÖPNV im Großraum Freiburg
 (AP5)

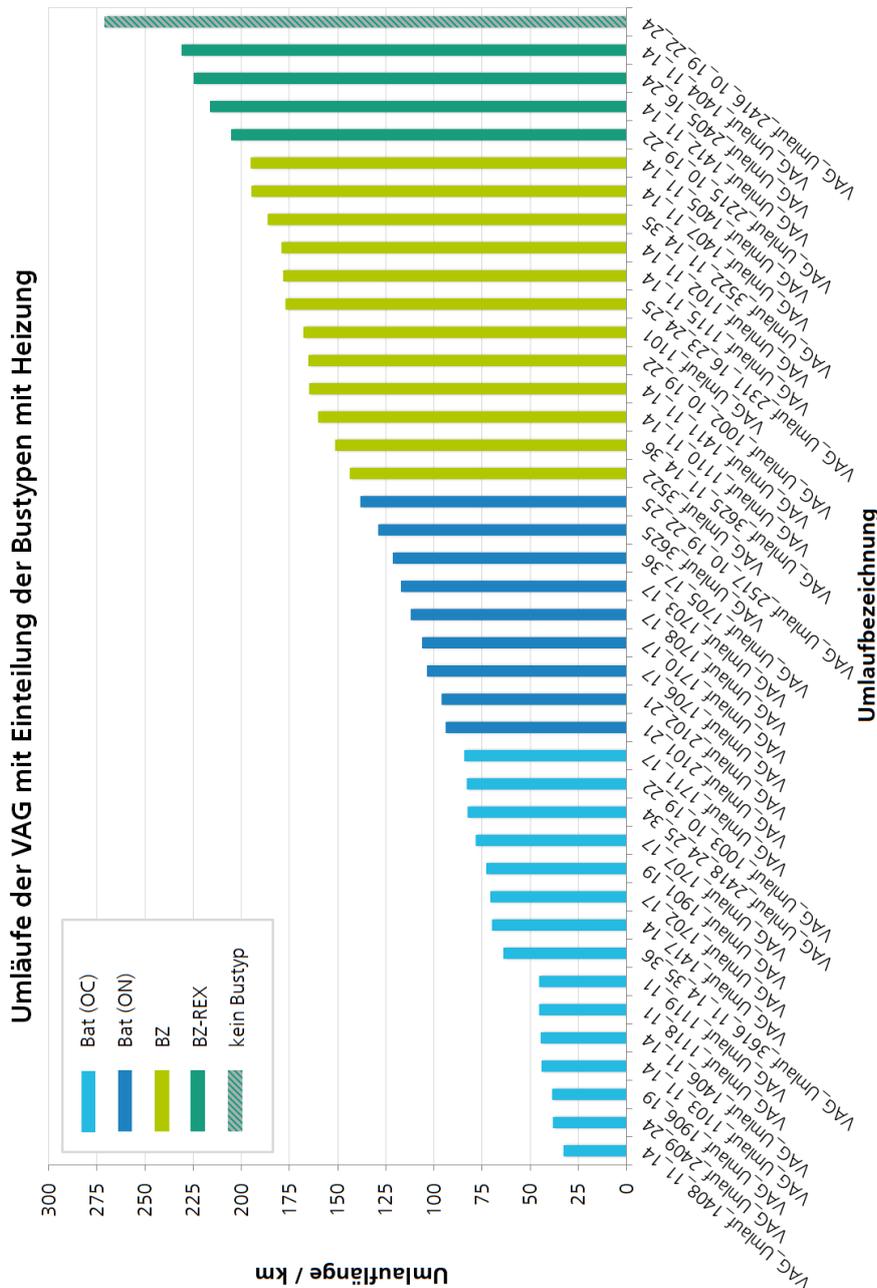


Abb. 27 Ergebnis der Potenzialanalyse – Umläufe der VAG (mit Einfluss von Heizung)

6.2.2 SBG

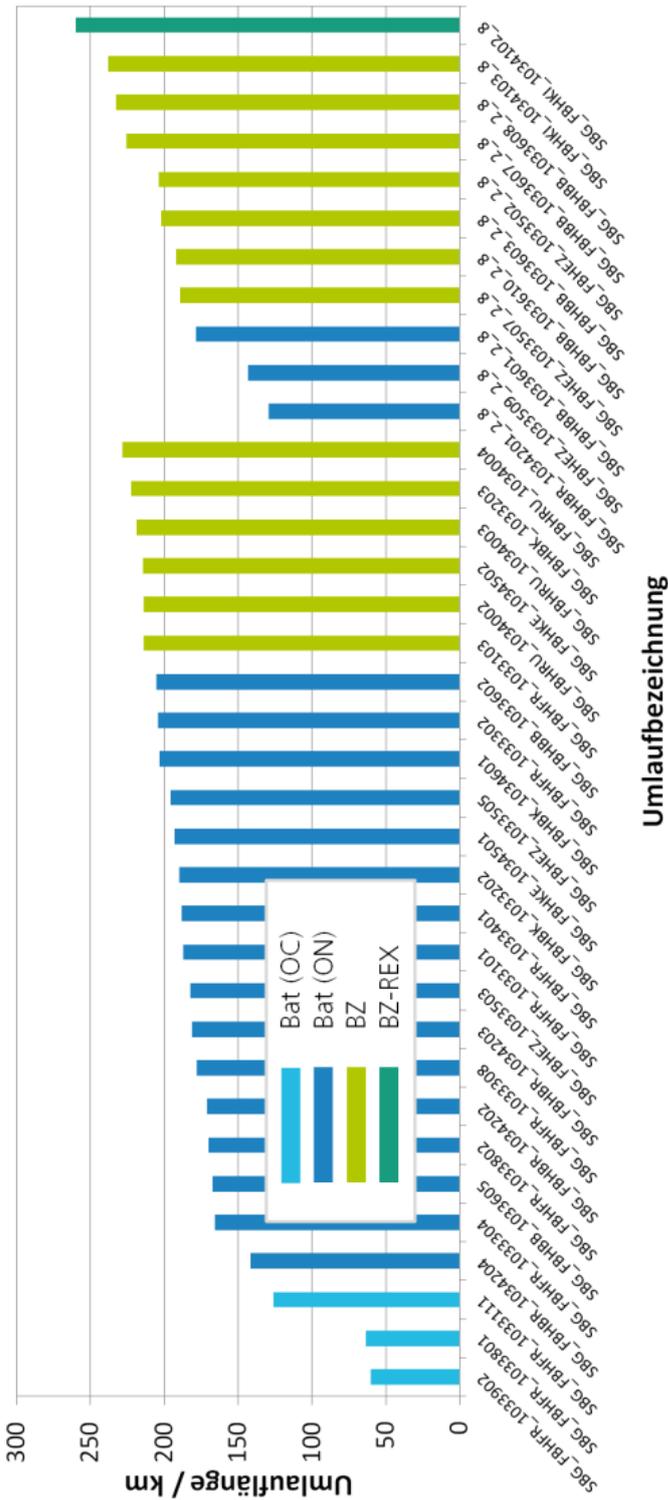
Die Umläufe der SBG weisen insgesamt eine höhere Umlauflänge auf (siehe Abb. 28). Lediglich sechs Umläufe sind kürzer als 150 km, bei der VAG waren es 25 Umläufe. Eine weitere Besonderheit stellt hier die höhere Steigungsrate der Strecken dar, die einen negativen Einfluss auf die Reichweite hat. Die Steigungsraten sind hier in drei Kategorien eingeteilt (auch am Einknicken der Balken erkennbar):

- Steigung: < 2 % (von SBG_FBHFR_1033902 bis SBG_FBHRU_1034004)
- Steigung: 2 - 8 % (von SBG_FBHBR_1034201_2_8 - SBG_FBHBB_1033608_2_8)
- Steigung: > 8 % (SBG_FBHKL_1034103_8 und SBG_FBHKL_1034102_8)

Für die Umläufe mit einer Steigung unter zwei Prozent wurde angenommen, dass diese keinen Einfluss auf die Reichweite der Busse haben und den Hersteller-Toleranzen entspricht. Für die Umläufe mit einer Steigung von 2-8 % sowie über 8 % wurde ein zusätzlicher Energiebedarf anhand von Literaturwerten berücksichtigt.

Dies führt dazu, dass Umläufe mit einer höheren Steigung gegebenenfalls nicht mehr mit demselben Bustypen realisiert werden kann, wie bei Umläufen ohne relevante Steigung, wie in Abb. 28 zu erkennen ist. Insgesamt ist der Anteil der Umläufe die mit Batteriebusen mit Opportunity Charging ausgestattet sind deutlich geringer (lediglich drei). Den höchsten Anteil haben Batteriebusse mit Overnight-Charging. Diese können theoretisch die Hälfte der Strecken befahren. Aufgrund der längeren Umläufe müssten Brennstoffzellenbusse deutlich mehr Strecken übernehmen. Ein Bus mit Brennstoffzellen-Range-Extender müsste theoretisch für den längsten Umlauf eingesetzt werden.

Umläufe der SBG mit Einteilung der Bustypen ohne Einflüsse und mit verschiedenen Steigungen

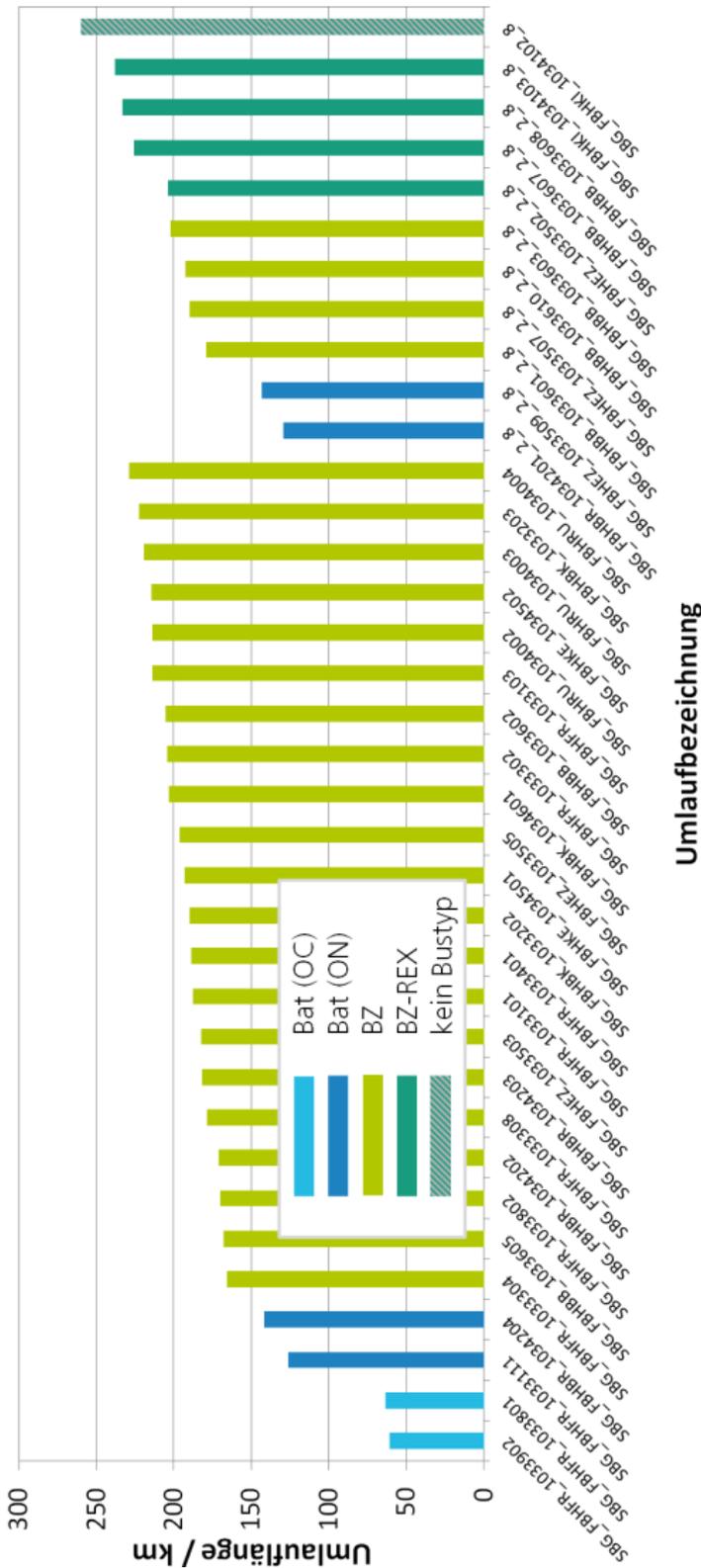


Synthese: Erhebung des Potenzials für Wasserstoff im ÖPNV im Großraum Freiburg (AP5)

Abb. 28 Ergebnis der Potenzialanalyse – Umläufe der SBG (ohne Einfluss von Klima/Heizung)

Auch für den Betrieb während hoher Außentemperaturen und notwendiger Klimatisierung der Busse kann lediglich ein Umlauf mehr mit Batteriebussen (OC und ON), jetzt sechs, befahren werden. Der Anteil von Brennstoffzellenbusse erhöht sich jedoch deutlich bei gleichzeitiger Reduzierung der Busse mit Brennstoffzellen-Range-Extender im Vergleich zum Winter-Szenario. 25 der insgesamt 36 Umläufe können im Sommerbetrieb mit Brennstoffzellenbussen befahren werden. Lediglich ein Umlauf kann im Sommer nicht befahren werden.

Umläufe der SBG mit Einteilung der Bustypen mit Klimaanlage und verschiedenen Steigungen



Synthese: Erhebung des Potenzials für Wasserstoff im ÖPNV im Großraum Freiburg (AP5)

Abb. 29 Ergebnis der Potenzialanalyse – Umläufe der SBG (mit Einfluss von Klima)

Wie zuvor für die Umläufe der VAG wurde auch eine Analyse der Umläufe für den Winterbetrieb und den Sommerbetrieb für die Umläufe der SBG durchgeführt. Für den Winterbetrieb, in Abb. 30 reduziert sich der Anteil der Batteriebusse (OC und ON) deutlich. Von zuvor 22 Umläufen können im Winter nur fünf befahren werden ohne Gefahr zu laufen, auf der Strecke liegen zu bleiben. Während die Anzahl der Umläufe für Brennstoffzellenbusse sich nur marginal im Winterbetrieb ändert, erhöht sich die

Anzahl der Busse mit Brennstoffzellen-Range-Extender deutlich von zuvor einem Umlauf auf nun 14 Umläufe. Drei Umläufe können im Winter aufgrund des Energiebedarfs der Heizung auch mit Bussen mit Brennstoffzellen-Range-Extender nicht angefahren werden.

Synthese: Erhebung des Potenzials für Wasserstoff im ÖPNV im Großraum Freiburg (AP5)

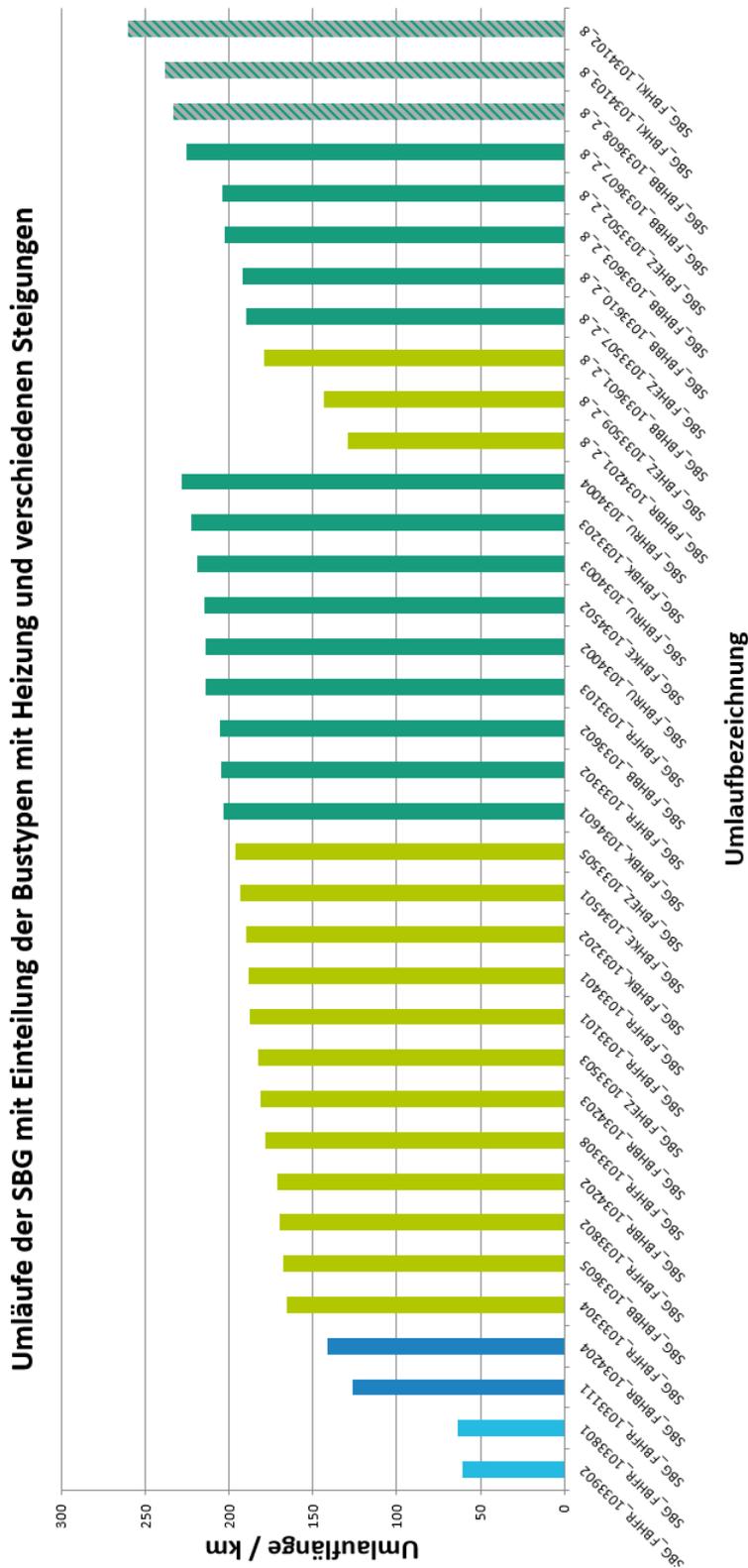


Abb. 30 Ergebnis der Potenzialanalyse - Umläufe der SBG (mit Einfluss von Heizung)

6.3 Zwischenfazit zur Potenzialerhebung

Synthese: Erhebung des
Potenzials für Wasserstoff im
ÖPNV im Großraum Freiburg
(AP5)

Aus den vorangegangenen Ergebnissen wird deutlich, dass sich die Reichweite von Bussen mit Batterie- und Brennstoffzelleantrieb in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur deutlich verringert.

Da der Energiebedarf für die Beheizung der Busse im Winter den größten Einfluss auf die Reichweite hat und diese somit an geringsten ist, wird dies als der für alle weiteren Betrachtungen relevante Fall angesehen. Es gilt damit die Aussage: Ein Umlauf, der von einer spezifischen Antriebstechnologie im Winter bei voller Heizleistung befahren werden kann, kann auch zu jeder anderen Jahreszeit befahren werden.

Das maximale Potenzial für Wasserstoffbusse im Großraum Freiburg ergibt sich daher aus den Abbildungen Abb. 27 (VAG) und Abb. 30 (SBG).

Da es nicht realistisch erscheint, dass die VAG einen einzelnen Umlauf, der sich unter den hier getroffenen Annahmen nicht mittels BZ-REX-Bussen bewältigen lässt, auch in ferner Zukunft weiterhin mit Dieseln Bussen befährt, wird nachfolgend ein technischer Fortschritt der BZ-REX-Technologie oder eine Änderung des entsprechenden Umlaufs angenommen. Dies hätte zur Folge, dass sich auch dieser längste Umlauf der VAG mittels BZ-REX-Bussen befahren lässt, weshalb dieser Bus in der nachfolgenden Konzepterstellung berücksichtigt wird.

Gleiches gilt für die drei anspruchsvollsten Umläufe der SBG (große Steigung, große Umlauflänge). Auch hier wird entweder Technologieentwicklung oder eine Änderung der Umläufe angenommen und diese daher für den Wasserstoffbedarf in der Konzepterstellung berücksichtigt.

Etwas anders verhält es sich mit den kürzesten sechs Umläufen der SBG (unter Berücksichtigung der Steigung). Laut Potenzialanalyse eignen sich diese problemlos für den Einsatz von Batteriebusen. Da es jedoch unwahrscheinlich erscheint, dass die SBG für eine so geringe Anzahl Fahrzeuge eine eigene Lade- und Wartungsinfrastruktur aufbaut, wird in der Konzepterstellung auch für diese Busse der Einsatz von BZ-Bussen angenommen. Alternativ wäre es denkbar, diese Fahrzeuge z.B. an der Infrastruktur der VAG zu laden und dafür eine vertragliche Regelung zu treffen. Dies wird im Folgenden jedoch nicht betrachtet.

In der Konzepterstellung wird daher angenommen, dass 100 % der Umläufe der SBG und 39 % der Umläufe der VAG als Brennstoffzellenbusse eingesetzt werden. Hieraus ergibt sich, dass künftig 100 % der Umlauflänge der SBG und 63 % der Umlauflänge der VAG durch wasserstoffgetriebene Busse abgedeckt werden. Die Divergenz zwischen dem Anteil der geeigneten Umläufe und dem Anteil der geeigneten Umlauflänge ist darin begründet, dass vor allem lange Umläufe geeignet sind.

Mit Hilfe dieser Ergebnisse werden die Wasserstoffbedarfszeitreihen der VAG und SBG (vgl. Kapitel 7.3.2) skaliert und daraus eine Betankungszeitreihe für Wasserstoffbusse generiert.

Es ist zu beachten, dass bei der Potenzialanalyse keine Zwischenladung der Batteriebusse mit Opportunity-Charging berücksichtigt wurde. Würde diese Option betrachtet, könnten Batteriebusse mit Gelegenheitsladung ihre tägliche Fahrstrecke durch die zusätzliche elektrische Energie vergrößern und hätte damit ein größeres Einsatzspektrum. Auch Umläufe mit größeren Streckenlängen könnten dann mit BEV-OC bedient werden.

Auf Basis der Synthese in AP 6 werden im Folgenden Konzepte erarbeitet und analysiert, mit denen sich das gesamte Potenzial an Wasserstoffbussen im Großraum Freiburg mit Wasserstoff versorgen ließe.

Dabei wird in zwei Ausbaustufen unterschieden, eine erste Ausbaustufe mit zunächst nur wenigen BZ-Bussen sowie eine finale Ausbaustufe, bei der das gesamte Potenzial im Großraum Freiburg betrachtet wird.

Nach einer grundlegenden Konzepterstellung (Kapitel 7.1) wurden die Konzepte mit Hilfe der Toolbox *H₂ProSim* simuliert, die seit 2012 am Fraunhofer ISE für die techno-ökonomische Bewertung von Wasserstoffsystemen entwickelt und eingesetzt wird (Kapitel 7.3). Die techno-ökonomischen Ergebnisse der Konzeptbewertung für die unterschiedlichen Ausbaustufen sind in Kapitel 7.4 dargestellt.

7.1 Konzepterstellung

In der Wasserstoffbranche herrscht weitestgehend Einigkeit darüber, dass für die Versorgung von Wasserstoffbussen ausschließlich Nebenproduktwasserstoff oder Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen („grüner Wasserstoff“) eingesetzt werden soll.

Für die Erzeugung von Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen eignet sich vor allem die Elektrolyse, bei der Wasser mit Hilfe von elektrischem Strom aus erneuerbaren Quellen in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird. Die Elektrolyse stellt derzeit das einzige Verfahren zur großskaligen Erzeugung grünen Wasserstoffs dar und wird daher in diesem Projekt als zentrale Technologie zur Erzeugung des benötigten Wasserstoffs ausgewählt. Zusätzlich berücksichtigt wird die Nutzung von Nebenproduktwasserstoff, wie er etwa in der chemischen Industrie anfällt.

Je nach Größe der finalen Ausbaustufe sind laut Reuter et al. [35] unterschiedliche Infrastrukturlösungen zu favorisieren. Nachfolgend sind einige der Erkenntnisse aus Reuter et al. [35] aufgeführt, die aus Sicht der Autoren für dieses Projekt von besonderer Relevanz sind und bei der Konzeptauswahl berücksichtigt wurden:

- H₂-Erzeugung allgemein
 - möglichst geringe Strombezugskosten sind ein Schlüssel beim Einsatz einer Onsite-Elektrolyseanlage
 - durch direkte Nutzung erneuerbaren Stroms (ohne Nutzung des öffentlichen Stromnetzes) können die Strombezugskosten reduziert werden
- Onsite-Elektrolyse
 - Viele Busbetreiber haben kein Interesse am Betrieb einer Onsite-Elektrolyse
 - Bevorzugt wird ein Partner, der Errichtung und Betrieb komplett übernimmt
- Onsite-Wasserstofftankstelle
 - Wird von vielen Busbetreibern gegenüber externer Betankung bevorzugt, solange der Betrieb einer möglichen Onsite-Elektrolyse an einen Partner ausgelagert ist

Zusätzlich wird in Reuter et al. [35] ein modularer Aufbau der Wasserstofftankstelle und -infrastruktur empfohlen. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass die Größe der Infrastruktur und die Anzahl der Wasserstoffbusse in der Flotte jederzeit möglichst gut zueinander passen und unnötige Überkapazitäten (sowie die damit verbundenen Kosten) vermieden werden. Da es sich bei dem hier beschriebenen Arbeitspaket 6 um eine erste grobe Konzepterstellung handelt und derzeit noch keine Realisierung in Form einer Baumaßnahme geplant ist, wird dieser modulare Aufbau

zunächst nicht weiter berücksichtigt. Sollte es in einem nachgelagerten Projekt zu einer Realisierung kommen, wird dies bei der Auslegung und Dimensionierung der Infrastruktur während des Flottenhochlaufs selbstverständlich berücksichtigt werden.

Konzepterstellung für eine
Wasserstoffinfrastruktur im
Großraum Freiburg (AP6)

Nachfolgend wird unterschieden in die erste Ausbaustufe, in der lediglich eine kleine einstellige Anzahl an Wasserstoffbussen versorgt werden muss und die finale Ausbaustufe, in der ein Konzept für die Versorgung des vollständigen Potenzials erarbeitet wird.

7.1.1 Erste Ausbaustufe – Konzept 0

Die im Projekt als assoziierte Partner eingebundenen Omnibusbetreiber VAG und SBG verfügen bislang über keine Erfahrungen im Betrieb von Wasserstoffbussen. Da an den Betrieb von Omnibussen im ÖPNV hinsichtlich der Verfügbarkeit hohe Anforderungen gestellt werden, bedeutet die Einführung einer neuen Antriebstechnologie, ganz gleich welcher Art, immer eine gewisse Unsicherheit. Dieser Unsicherheit können Busbetreiber beispielsweise durch eine Testphase begegnen. Dabei werden einige wenige Fahrzeuge mit der neuen Antriebstechnologie beschafft und diese testweise, auch über längere Zeiträume, im Regelbetrieb eingesetzt. Dies hat den Vorteil, dass der Betreiber langsam Erfahrungen sammeln und sich auf die Antriebstechnologie einstellen kann. Zudem können mögliche Ausfälle durch die weiterhin vorhandenen Bestandsfahrzeuge, bei der VAG und SBG sind das Dieselbusse, kompensiert werden. Ausfälle des ÖPNV-Angebots können so vermieden werden.

Als erste mögliche Ausbaustufe wird in diesem Projekt daher die Beschaffung von vier Wasserstoffbussen mit Brennstoffzellenantrieb angenommen, jeweils zwei pro Betreiber.

Der Aufbau einer eigenen Wasserstoffinfrastruktur, bestehend aus Erzeugung oder Anlieferung und betriebseigener Tankstelle, wie dies auf größeren Depots für Diesel heutzutage üblich ist, stellt aufgrund der geringen Stückzahl zu versorgender Fahrzeuge keine wirtschaftliche Lösung dar [35]. Daher wird für die erste Ausbaustufe eine Betankung an einer öffentlichen PKW-Tankstelle (700 bar-Technologie) der H2Mobility – momentan der einzige kommerzielle Errichter von Wasserstofftankstellen in größerer Stückzahl –, die zusätzlich mit einer Option zur Betankung von Bussen ausgerüstet wird (350 bar-Technologie), als beste Lösung bewertet. Diese Lösung hat mehrere Vorteile. Zum einen sind die Investitionskosten vergleichsweise gering, da der Busbetreiber lediglich die Mehrkosten für die Errichtung der 350 bar-Stränge tragen muss. Hierfür sind unterschiedliche Abrechnungsmodelle möglich, die von der H2Mobility angeboten werden.

Zum anderen werden Betrieb und Wartung der gesamten Tankstelle sowie die Wasserstoffbeschaffung durch die H2Mobility organisiert. Sollte nach Ende einer Testphase durch den Busbetreiber eine betriebseigene Tankstelle errichtet werden, so könnte die Tankstelle der H2Mobility inkl. des 350 bar-Strangs weiterhin genutzt werden, sei es durch Dritte oder als Ausweichlösung im Fall von technischen Störungen an der eigenen Tankstelle. Jedoch muss an der Stelle daraufhin gewiesen werden, dass hier unter Umständen nur Wasserstoff aus Dampfreformierung verfügbar ist, der aber ggf. in naher Zukunft durch den Zukauf von Grünwasserstoff-Zertifikaten (vgl. EU-Projekt CertifHy) ohne Unterbrechung der Versorgungsketten grün gestaltet werden kann.

Ferner wird empfohlen, dass diese ersten Fahrzeuge alle innerhalb des Freiburger Stadtgebiets auf den Betriebshöfen der VAG und SBG stationiert sind und der Weg zur ebenfalls im Freiburger Stadtgebiet gelegenen Tankstelle somit vergleichsweise kurz ist und die Änderungen im Betriebsablauf damit gering sind.

7.1.2 Finale Ausbaustufe

Basierend auf den Erkenntnissen aus Reuter et al. [35] wurden in diesem Projekt unterschiedliche Konzepte entwickelt und techno-ökonomisch miteinander verglichen. Grundsätzlich besteht ein Konzept immer aus den folgenden drei Bausteinen:

- Wasserstofferzeugung / -versorgung
- Wasserstofftankstelle (Hydrogen Refueling Station, HRS)
- H₂-Bedarf

Jeder Baustein kann dabei in unterschiedlichen Ausführungen zum Einsatz kommen, beispielsweise kann die Wasserstoffversorgung mittels Onsite-Elektrolyse (eigene H₂-Produktion am Standort der Tankstelle), Offsite-Elektrolyse (eigene H₂-Produktion, jedoch nicht am Standort der Tankstelle) oder durch externen Zukauf erfolgen. Analog dazu gibt es Unterschiede bei den Tankstellen und beim H₂-Bedarf.

Zur Übersicht sind in Tab. 06 alle betrachteten Konzepte sowie die darin verwendeten Bausteine dargestellt. Im Detail werden die Konzepte in den Kapiteln 7.1.2.1 bis 7.1.2.10 näher beschrieben.

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

| Konzept | Wasserstoffversorgung | | | HRS | | H ₂ -Bedarf | |
|---------|-----------------------|------------|-----------------|--------|---------|------------------------|-------------|
| | Onsite-EL | Offsite-EL | Externer Zukauf | Onsite | Offsite | Busse (VAG) | Busse (SBG) |
| 0 | | | X (grau) | | X | | |
| 1.1.1 | | X | | X | | X | X |
| 1.1.2 | | X | | X | | X | X |
| 2.1 | X | | | X | | X | |
| 2.2 | X | | | X | | | X |
| 3.1 | | | X (grün) | X | | X | |
| 3.2 | | | X (grün) | X | | | X |
| 4.1 | | | X (grau) | X | | X | |
| 4.2 | | | X (grau) | X | | | X |

Tab. 06 Übersicht der betrachteten Konzepte für eine erste (Sz. 0) und die finale Ausbaustufe (Sz. 1.1.1 – 4.2)

7.1.2.1 Konzept 1.1.1 – VAG + SBG

In diesem Konzept erfolgt die Wasserstoffversorgung für beide Tankstellen (HRS1-VAG und HRS2-SBG) mittels einer eigenen, zentralen Elektrolyseanlage, die in einer Entfernung von ca. 30 Minuten Fahrtzeit von den Standorten der Tankstellen entfernt im Freiburger Umland steht. Der Transport des Wasserstoffs erfolgt mittels zweier Trailer. Die Tankstellen sind jeweils auf dem Betriebshof der Busunternehmen VAG und SBG errichtet. Der Wasserstoffbedarf der Busse von VAG und SBG ergibt sich aus den Potenzialanalysen in Kapitel 6.

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

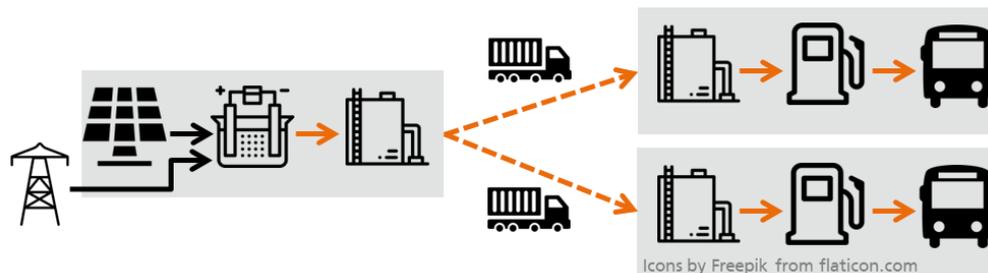


Abb. 31 Schematische Darstellung des Aufbaus von Konzept 1.1.1

Wasserstoffversorgung

Die Wasserstoffherzeugung erfolgt mittels einer PEM-Elektrolyseanlage. Die Leistung der Elektrolyseanlage ist dabei so dimensioniert, dass die Anlage im Dauerbetrieb (8760 h pro Jahr) die gesamte an den Tankstellen erforderliche Wasserstoffmenge erzeugen kann.

Zur Stromversorgung wird direkt am Standort der Elektrolyseanlage ein eigenes PV-Kraftwerk errichtet. Der entstehende Strom wird vollständig zur Elektrolyse eingesetzt. In Zeiten, in denen das PV-Kraftwerk weniger elektrische Leistung liefert, als die Elektrolyse benötigt (z.B. nachts), werden fehlende Strommengen aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen.

Das entstehende Wasserstoffgas wird am Standort der Elektrolyse aufgereinigt und getrocknet. Mittels eines Mitteldruckverdichters wird der Gasdruck erhöht und das Gas anschließend direkt in einem Trailer gefüllt, der sich am Standort der Elektrolyse befindet. In Abb. 31 ist der Trailer als Speichertank dargestellt.

Wasserstofftransport

Sobald der Trailer seinen Maximaldruck erreicht hat und somit vollständig gefüllt ist, verlässt er die Elektrolyseanlage und fährt zu einer der beiden Tankstellen. Dabei wird jene Tankstelle zuerst beliefert, die einen geringen Druck im Massespeicher hat. Sollte nach Abschluss der Belieferung (Massespeicher an der Tankstelle vollgefüllt) noch Wasserstoff im Trailer enthalten sein, beliefert dieser direkt die zweite Tankstelle. Anschließend fährt der Trailer zurück zur Elektrolyseanlage, um neuen Wasserstoff zu laden.

Sollte der Füllstand des Massespeichers an einer der Tankstellen einen unten Grenzwert unterschreiten, fährt der Trailer von der Elektrolyseanlage auch dann los, wenn er noch nicht vollständig gefüllt ist und führt eine „Notbelieferung“ der Tankstelle durch.

Wasserstofftankstelle

In diesem Konzept werden zwei Wasserstofftankstellen berücksichtigt, von denen jeweils eine an jedem der beiden Betriebshöfe aufgestellt ist. Eine Tankstelle steht somit auf dem Betriebshof der VAG in der Besançonallee in Freiburg, die zweite auf dem Betriebshof der SBG in der Robert-Bunsen-Straße.

Die Wasserstofftankstellen bestehen aus einem Massespeicher, in dem große Mengen Wasserstoffgas bei einem moderaten Druck gespeichert werden. Dieser Speicher dient der zeitlichen Entkoppelung von Wasserstoffanlieferung und Wasserstoffverbrauch

(durch Betankungen). Zusätzlich gibt es an den Tankstellen einen Hochdruck-Speicher (HD-Speicher), bei dem kleinere Mengen Wasserstoffgas bei hohem Druck für die nächste Betankung vorgehalten werden. Beide Speicher sind über einen Kompressor miteinander verbunden. Unterschreitet der Druck im HD-Speicher einen Schwellwert, entnimmt der Kompressor Wasserstoffgas aus dem Massespeicher, verdichtet dieses und befüllt damit den HD-Speicher. Sobald ein oberer Schwellwert erreicht ist, schaltet der Kompressor wieder aus.

Die eigentliche Betankung eines Omnibusses erfolgt durch ein Überströmen von gasförmigem Wasserstoff aus dem HD-Speicher in den Tank des Fahrzeugs. Dabei wird ein Druckgefälle zwischen dem HD-Speicher (höherer Druck) und dem Fahrzeugtank genutzt (geringerer Druck). Sobald der Fahrzeugtank eine obere Druckgrenze erreicht hat, wird die Betankung beendet.

Beide Wasserstofftankstellen sind identisch aufgebaut.

H₂-Bedarf

Der Wasserstoffbedarf ergibt sich aus den Analysen in Kapitel 6. In diesem Konzept versorgt jede der zwei Tankstellen das maximale Ausbaupotenzial an Wasserstoffbussen des jeweiligen Busbetreibers. Für beide Depots wurde anhand realer Messdaten vergangener Betankungen eine Betankungszeitreihe erstellt und für die Simulationen genutzt.

7.1.2.2 Konzept 1.1.2 – VAG + SBG

Analog zu Konzept 1.1.1 (siehe Kapitel 7.1.2.1) erfolgt die Wasserstoffversorgung in diesem Konzept für beide Tankstellen (HRS1-VAG und HRS2-SBG) mittels einer eigenen, zentralen Elektrolyseanlage, die in einer Entfernung von ca. 30 Minuten Fahrtzeit von den Standorten der Tankstellen entfernt im Freiburger Umland steht. Der Transport des Wasserstoffs erfolgt mittels zweier Trailer. Die Tankstellen sind jeweils auf dem Betriebshof der Busunternehmen VAG und SBG errichtet. Der Wasserstoffbedarf der Busse von VAG und SBG ergibt sich aus den Potenzialanalysen in Kapitel 6.

Der Unterschied zu Konzept 1.1.1 besteht lediglich in der Dimensionierung der Leistung des Photovoltaikkraftwerks. Diese ist um den Faktor 2,5 größer dimensioniert, als in Konzept 1.1.1 und als die Leistung der Elektrolyseanlage.

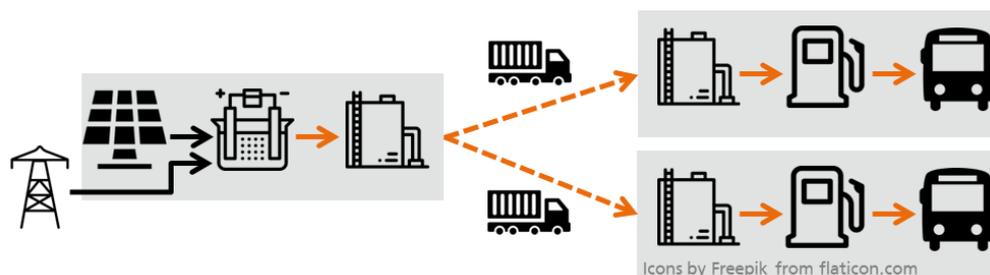


Abb. 32 Schematische Darstellung des Aufbaus von Konzept 1.1.2

Wasserstoffversorgung

Die Wasserstoffherzeugung erfolgt mittels einer PEM-Elektrolyseanlage. Die Leistung der Elektrolyseanlage ist dabei so dimensioniert, dass die Anlage im Dauerbetrieb (8760 h pro Jahr) die gesamte an den Tankstellen erforderliche Wasserstoffmenge erzeugen kann.

Zur Stromversorgung wird direkt am Standort der Elektrolyseanlage ein eigenes PV-Kraftwerk errichtet. Die Leistung des PV-Kraftwerks ist um den Faktor 2,5 größer dimensioniert, als in Konzept 1.1.1. Der entstehende Strom wird vollständig zur Elektrolyse eingesetzt. Leistungen oberhalb der Nennleistung der Elektrolyse bleiben ungenutzt. In Zeiten, in denen das PV-Kraftwerk weniger elektrische Leistung liefert, als

die Elektrolyse benötigt (z.B. nachts), werden fehlende Strommengen aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen.

Das entstehende Wasserstoffgas wird am Standort der Elektrolyse aufgereinigt und getrocknet. Mittels eines Mitteldruckverdichters wird der Gasdruck erhöht und das Gas anschließend direkt in einem Trailer gefüllt, der sich am Standort der Elektrolyse befindet. In Abb. 32 ist der Trailer als Speichertank dargestellt.

Konzepterstellung für eine
Wasserstoffinfrastruktur im
Großraum Freiburg (AP6)

Wasserstofftransport

Sobald der Trailer seinen Maximaldruck erreicht hat und somit vollständig gefüllt ist, verlässt er die Elektrolyseanlage und fährt zu einer der beiden Tankstellen. Dabei wird jene Tankstelle zuerst beliefert, die einen geringen Druck im Massespeicher hat. Sollte nach Abschluss der Belieferung (Massespeicher an der Tankstelle vollgefüllt) noch Wasserstoff im Trailer enthalten sein, beliefert dieser direkt die zweite Tankstelle. Anschließend fährt der Trailer zurück zur Elektrolyseanlage, um neuen Wasserstoff zu laden.

Sollte der Füllstand des Massespeichers an einer der Tankstellen einen unten Grenzwert unterschreiten, fährt der Trailer von der Elektrolyseanlage auch dann los, wenn er noch nicht vollständig gefüllt ist und führt eine „Notbelieferung“ der Tankstelle durch.

Wasserstofftankstelle

In diesem Konzept werden zwei Wasserstofftankstellen berücksichtigt, von denen jeweils eine an jedem der beiden Betriebshöfe aufgestellt ist. Eine Tankstelle steht somit auf dem Betriebshof der VAG in der Besançonallee in Freiburg, die zweite auf dem Betriebshof der SBG in der Robert-Bunsen-Straße.

Die Wasserstofftankstellen bestehen aus einem Massespeicher, in dem große Mengen Wasserstoffgas bei einem moderaten Druck gespeichert werden. Dieser Speicher dient der zeitlichen Entkoppelung von Wasserstoffanlieferung und Wasserstoffverbrauch (durch Betankungen). Zusätzlich gibt es an den Tankstellen einen Hochdruck-Speicher (HD-Speicher), bei dem kleinere Mengen Wasserstoffgas bei hohem Druck für die nächste Betankung vorgehalten werden. Beide Speicher sind über einen Kompressor miteinander verbunden. Unterschreitet der Druck im HD-Speicher einen Schwellwert, entnimmt der Kompressor Wasserstoffgas aus dem Massespeicher, verdichtet dieses und befüllt damit den HD-Speicher. Sobald ein oberer Schwellwert erreicht ist, schaltet der Kompressor wieder aus.

Die eigentliche Betankung eines Omnibusses erfolgt durch ein Überströmen von gasförmigem Wasserstoff aus dem HD-Speicher in den Tank des Fahrzeugs. Dabei wird ein Druckgefälle zwischen dem HD-Speicher (höherer Druck) und dem Fahrzeugtank genutzt (geringerer Druck). Sobald der Fahrzeugtank eine obere Druckgrenze erreicht hat, wird die Betankung beendet.

Beide Wasserstofftankstellen sind identisch aufgebaut.

H₂-Bedarf

Der Wasserstoffbedarf ergibt sich aus den Analysen in Kapitel 6. In diesem Konzept versorgt jede der zwei Tankstellen das maximale Ausbaupotenzial an Wasserstoffbussen des jeweiligen Busbetreibers. Für beide Depots wurde anhand realer Messdaten vergangener Betankungen eine Betankungszeitreihe erstellt und für die Simulationen genutzt.

7.1.2.3 Konzept 1.2.1 – VAG + SBG

Die Wasserstoffversorgung in diesem Konzept erfolgt für beide Tankstellen (HRS1-VAG und HRS2-SBG) mittels einer eigenen, zentralen Elektrolyseanlage, die in einer Entfernung von ca. 30 Minuten Fahrtzeit von den Standorten der Tankstellen entfernt im Freiburger Umland steht. Da die Elektrolyseanlage in diesem Konzept über keinen Anschluss an das öffentliche Stromnetz verfügt sondern ausschließlich durch ein PV-

Kraftwerk versorgt wird, werden fehlende Wasserstoffmengen zur Deckung des Bedarfs von extern zugekauft. Der Transport des Wasserstoffs zwischen Elektrolyse und den Tankstellen erfolgt mittels zweier Trailer. Die Tankstellen sind jeweils auf dem Betriebshof der Busunternehmen VAG und SBG errichtet. Der Wasserstoffbedarf der Busse von VAG und SBG ergibt sich aus den Potenzialanalysen in Kapitel 6.

 Konzepterstellung für eine
 Wasserstoffinfrastruktur im
 Großraum Freiburg (AP6)

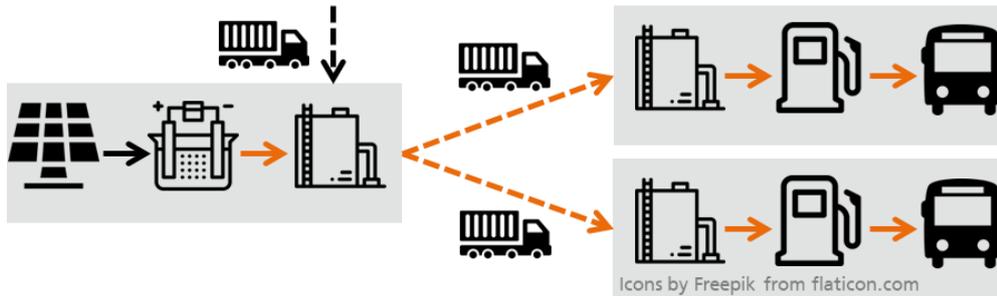


Abb. 33 Schematische Darstellung des Aufbaus von Konzept 1.2.1

Wasserstoffversorgung

Die Wasserstofferzeugung erfolgt teilweise mittels einer PEM-Elektrolyseanlage und teilweise durch externen Zukauf von Wasserstoff.

Zur Stromversorgung der Elektrolyse wird direkt am Standort der Elektrolyseanlage ein eigenes PV-Kraftwerk errichtet. Der entstehende Strom wird vollständig zur Elektrolyse eingesetzt. Das entstehende Wasserstoffgas wird am Standort der Elektrolyse aufgereinigt und getrocknet. Mittels eines Mitteldruckverdichters wird der Gasdruck erhöht und das Gas anschließend direkt in einem Trailer gefüllt, der sich am Standort der Elektrolyse befindet. In Abb. 33 ist der Trailer als Speichertank dargestellt.

In Zeiten, in denen die Elektrolyseanlage nicht die erforderliche Wasserstoffmenge liefern kann (z.B. nachts), wird die fehlende Menge durch Zukauf von einer externen Erzeugungsstelle bezogen. Die Lieferung des extern zugekauften Wasserstoffs erfolgt dabei direkt an den Massespeicher der jeweiligen Tankstelle.

Wasserstofftransport

Sobald der Trailer seinen Maximaldruck erreicht hat und somit vollständig gefüllt ist, verlässt er die Elektrolyseanlage und fährt zu einer der beiden Tankstellen. Dabei wird jene Tankstelle zuerst beliefert, die einen geringen Druck im Massespeicher hat. Sollte nach Abschluss der Belieferung (Massespeicher an der Tankstelle vollgefüllt) noch Wasserstoff im Trailer enthalten sein, beliefert dieser direkt die zweite Tankstelle. Anschließend fährt der Trailer zurück zur Elektrolyseanlage, um neuen Wasserstoff zu laden.

Sollte der Füllstand des Massespeichers an einer der Tankstellen einen unten Grenzwert unterschreiten, fährt der Trailer von der Elektrolyseanlage auch dann los, wenn er noch nicht vollständig gefüllt ist und führt eine „Notbelieferung“ der Tankstelle durch.

Wasserstofftankstelle

In diesem Konzept werden zwei Wasserstofftankstellen berücksichtigt, von denen jeweils eine an jedem der beiden Betriebshöfe aufgestellt ist. Eine Tankstelle steht somit auf dem Betriebshof der VAG in der Besançonallee in Freiburg, die zweite auf dem Betriebshof der SBG in der Robert-Bunsen-Straße.

Die Wasserstofftankstellen bestehen aus einem Massespeicher, in dem große Mengen Wasserstoffgas bei einem moderaten Druck gespeichert werden. Dieser Speicher dient der zeitlichen Entkoppelung von Wasserstoffanlieferung und Wasserstoffverbrauch (durch Betankungen). Zusätzlich gibt es an den Tankstellen einen Hochdruck-Speicher (HD-Speicher), bei dem kleinere Mengen Wasserstoffgas bei hohem Druck für die nächste Betankung vorgehalten werden. Beide Speicher sind über einen Kompressor miteinander verbunden. Unterschreitet der Druck im HD-Speicher einen Schwellwert, entnimmt der Kompressor Wasserstoffgas aus dem Massespeicher, verdichtet dieses

und befüllt damit den HD-Speicher. Sobald ein oberer Schwellwert erreicht ist, schaltet der Kompressor wieder aus.

Die eigentliche Betankung eines Omnibusses erfolgt durch ein Überströmen von gasförmigem Wasserstoff aus dem HD-Speicher in den Tank des Fahrzeugs. Dabei wird ein Druckgefälle zwischen dem HD-Speicher (höherer Druck) und dem Fahrzeugtank genutzt (geringerer Druck). Sobald der Fahrzeugtank eine obere Druckgrenze erreicht hat, wird die Betankung beendet.

Beide Wasserstofftankstellen sind identisch aufgebaut.

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

H₂-Bedarf

Der Wasserstoffbedarf ergibt sich aus den Analysen in Kapitel 6. In diesem Konzept versorgt jede der zwei Tankstellen das maximale Ausbaupotenzial an Wasserstoffbussen des jeweiligen Busbetreibers. Für beide Depots wurde anhand realer Messdaten vergangener Betankungen eine Betankungszeitreihe erstellt und für die Simulationen genutzt.

7.1.2.4 Konzept 1.2.2 – VAG + SBG

Die Wasserstoffversorgung in diesem Konzept erfolgt (analog zu Konzept 1.2.1) für beide Tankstellen (HRS1-VAG und HRS2-SBG) mittels einer eigenen, zentralen Elektrolyseanlage, die in einer Entfernung von ca. 30 Minuten Fahrtzeit von den Standorten der Tankstellen entfernt im Freiburger Umland steht. Da die Elektrolyseanlage in diesem Konzept über keinen Anschluss an das öffentliche Stromnetz verfügt sondern ausschließlich durch ein PV-Kraftwerk versorgt wird, werden fehlende Wasserstoffmengen zur Deckung des Bedarfs von extern zugekauft. Der Transport des Wasserstoffs zwischen Elektrolyse und den Tankstellen erfolgt mittels zweier Trailer. Die Tankstellen sind jeweils auf dem Betriebshof der Busunternehmen VAG und SBG errichtet. Der Wasserstoffbedarf der Busse von VAG und SBG ergibt sich aus den Potenzialanalysen in Kapitel 6.

Der Unterschied zu Konzept 1.2.1 besteht lediglich in der Dimensionierung der Leistung des Photovoltaikkraftwerks. Diese ist um den Faktor 2,5 größer dimensioniert, als in Konzept 1.2.1 und als die Leistung der Elektrolyseanlage.

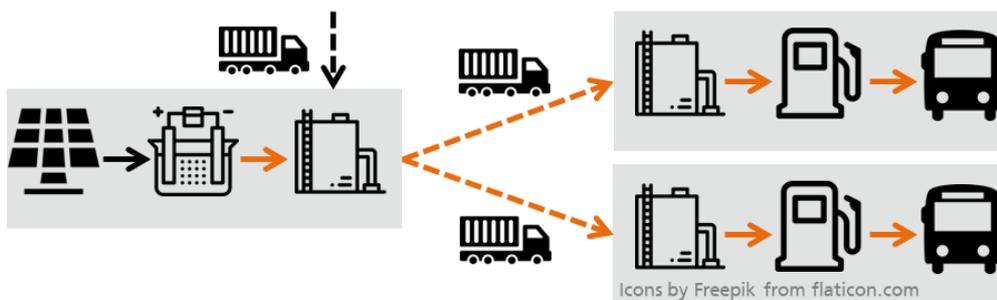


Abb. 34 Schematische Darstellung des Aufbaus von Konzept 1.2.2

Wasserstoffversorgung

Die Wasserstoffherzeugung erfolgt teilweise mittels einer PEM-Elektrolyseanlage und teilweise durch externen Zukauf von Wasserstoff.

Zur Stromversorgung der Elektrolyse wird direkt am Standort der Elektrolyseanlage ein eigenes PV-Kraftwerk errichtet. Die Leistung des PV-Kraftwerks ist um den Faktor 2,5 größer dimensioniert, als in Konzept 1.2.1. Der entstehende Strom wird vollständig zur Elektrolyse eingesetzt. Leistungen oberhalb der Nennleistung der Elektrolyse bleiben ungenutzt. Das entstehende Wasserstoffgas wird am Standort der Elektrolyse aufgereinigt und getrocknet. Mittels eines Mitteldruckverdichters wird der Gasdruck erhöht und das Gas anschließend direkt in einem Trailer gefüllt, der sich am Standort der Elektrolyse befindet. In Abb. 34 ist der Trailer als Speichertank dargestellt.

In Zeiten, in denen die Elektrolyseanlage nicht die erforderliche Wasserstoffmenge liefern kann (z.B. nachts), wird die fehlende Menge durch Zukauf von einer externen Erzeugungsstelle bezogen. Die Lieferung des extern zugekauften Wasserstoffs erfolgt dabei direkt an den Massespeicher der jeweiligen Tankstelle.

Konzepterstellung für eine
Wasserstoffinfrastruktur im
Großraum Freiburg (AP6)

Wasserstofftransport

Sobald der Trailer seinen Maximaldruck erreicht hat und somit vollständig gefüllt ist, verlässt er die Elektrolyseanlage und fährt zu einer der beiden Tankstellen. Dabei wird jene Tankstelle zuerst beliefert, die einen geringen Druck im Massespeicher hat. Sollte nach Abschluss der Belieferung (Massespeicher an der Tankstelle vollgefüllt) noch Wasserstoff im Trailer enthalten sein, beliefert dieser direkt die zweite Tankstelle. Anschließend fährt der Trailer zurück zur Elektrolyseanlage, um neuen Wasserstoff zu laden.

Sollte der Füllstand des Massespeichers an einer der Tankstellen einen unten Grenzwert unterschreiten, fährt der Trailer von der Elektrolyseanlage auch dann los, wenn er noch nicht vollständig gefüllt ist und führt eine „Notbelieferung“ der Tankstelle durch.

Wasserstofftankstelle

In diesem Konzept werden zwei Wasserstofftankstellen berücksichtigt, von denen jeweils eine an jedem der beiden Betriebshöfe aufgestellt ist. Eine Tankstelle steht somit auf dem Betriebshof der VAG in der Besançonallee in Freiburg, die zweite auf dem Betriebshof der SBG in der Robert-Bunsen-Straße.

Die Wasserstofftankstellen bestehen aus einem Massespeicher, in dem große Mengen Wasserstoffgas bei einem moderaten Druck gespeichert werden. Dieser Speicher dient der zeitlichen Entkoppelung von Wasserstoffanlieferung und Wasserstoffverbrauch (durch Betankungen). Zusätzlich gibt es an den Tankstellen einen Hochdruck-Speicher (HD-Speicher), bei dem kleinere Mengen Wasserstoffgas bei hohem Druck für die nächste Betankung vorgehalten werden. Beide Speicher sind über einen Kompressor miteinander verbunden. Unterschreitet der Druck im HD-Speicher einen Schwellwert, entnimmt der Kompressor Wasserstoffgas aus dem Massespeicher, verdichtet dieses und befüllt damit den HD-Speicher. Sobald ein oberer Schwellwert erreicht ist, schaltet der Kompressor wieder aus.

Die eigentliche Betankung eines Omnibusses erfolgt durch ein Überströmen von gasförmigem Wasserstoff aus dem HD-Speicher in den Tank des Fahrzeugs. Dabei wird ein Druckgefälle zwischen dem HD-Speicher (höherer Druck) und dem Fahrzeugtank genutzt (geringerer Druck). Sobald der Fahrzeugtank eine obere Druckgrenze erreicht hat, wird die Betankung beendet.

Beide Wasserstofftankstellen sind identisch aufgebaut.

H₂-Bedarf

Der Wasserstoffbedarf ergibt sich aus den Analysen in Kapitel 6. In diesem Konzept versorgt jede der zwei Tankstellen das maximale Ausbaupotenzial an Wasserstoffbussen des jeweiligen Busbetreibers. Für beide Depots wurde anhand realer Messdaten vergangener Betankungen eine Betankungszeitreihe erstellt und für die Simulationen genutzt.

7.1.2.5 Konzept 2.1 - VAG

In diesem Konzept erfolgt die Wasserstoffversorgung ausschließlich für die Tankstelle der VAG (HRS1) mittels einer eigenen Onsite-Elektrolyseanlage, die direkt am Standort der Tankstelle angesiedelt ist. Der Transport des Wasserstoffs von der Elektrolyseanlage zur Tankstelle erfolgt über eine kurze Rohrleitung. Die Tankstelle ist auf dem Betriebshof des Busunternehmens VAG errichtet. Der Wasserstoffbedarf der Busse der VAG ergibt sich aus den Potenzialanalysen in Kapitel 6.



Abb. 35 Schematische Darstellung des Aufbaus von Konzept 2.1

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Wasserstoffversorgung

Die Wasserstoffherzeugung erfolgt mittels einer PEM-Elektrolyseanlage. Die Leistung der Elektrolyseanlage ist dabei so dimensioniert, dass die Anlage im Dauerbetrieb (8760 h pro Jahr) die gesamte an der Tankstelle erforderliche Wasserstoffmenge erzeugen kann.

Die Stromversorgung der Elektrolyseanlage erfolgt über das öffentliche Stromnetz, eine eigene Stromerzeugung (z.B. mittels Photovoltaik) ist nicht vorgesehen.

Das entstehende Wasserstoffgas wird am Standort der Elektrolyse aufgereinigt und getrocknet. Mittels eines Mitteldruckverdichters wird der Gasdruck erhöht und das Gas anschließend im Massespeicher zwischengespeichert.

Wasserstofftankstelle

In diesem Konzept wird eine Tankstelle auf dem Betriebshof der VAG in der Besançonallee in Freiburg berücksichtigt.

Die Wasserstofftankstelle besteht aus einem Massespeicher, in dem große Mengen Wasserstoffgas bei einem moderaten Druck gespeichert werden. Dieser Speicher dient der zeitlichen Entkoppelung von Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse und Wasserstoffverbrauch (durch Betankungen). Zusätzlich gibt es an der Tankstelle einen Hochdruck-Speicher (HD-Speicher), bei dem kleinere Mengen Wasserstoffgas bei hohem Druck für die nächste Betankung vorgehalten werden. Beide Speicher sind über einen Kompressor miteinander verbunden. Unterschreitet der Druck im HD-Speicher einen Schwellwert, entnimmt der Kompressor Wasserstoffgas aus dem Massespeicher, verdichtet dieses und befüllt damit den HD-Speicher. Sobald ein oberer Schwellwert erreicht ist, schaltet der Kompressor wieder aus.

Die eigentliche Betankung eines Omnibusses erfolgt durch ein Überströmen von gasförmigem Wasserstoff aus dem HD-Speicher in den Tank des Fahrzeugs. Dabei wird ein Druckgefälle zwischen dem HD-Speicher (höherer Druck) und dem Fahrzeugtank genutzt (geringerer Druck). Sobald der Fahrzeugtank eine obere Druckgrenze erreicht hat, wird die Betankung beendet.

H₂-Bedarf

Der Wasserstoffbedarf ergibt sich aus den Analysen in Kapitel 6. In diesem Konzept versorgt die Tankstelle das maximale Ausbaupotenzial an Wasserstoffbussen der VAG Freiburg. Anhand realer Messdaten vergangener Betankungen wurde eine Betankungszeitreihe erstellt und für die Simulationen genutzt.

7.1.2.6 Konzept 2.2 - SBG

In diesem Konzept erfolgt die Wasserstoffversorgung ausschließlich für die Tankstelle der SBG (HRS2) mittels einer eigenen Onsite-Elektrolyseanlage, die direkt am Standort der Tankstelle angesiedelt ist. Das Konzept ist identisch zu Konzept 2.1 aufgebaut, lediglich die Parametrierung einzelner Komponenten und des Wasserstoffbedarfs unterscheiden sich (siehe Kapitel 7.3.2). Der Transport des Wasserstoffs von der Elektrolyseanlage zur Tankstelle erfolgt über eine kurze Rohrleitung. Die Tankstelle ist auf dem Betriebshof des Busunternehmens SBG errichtet. Der Wasserstoffbedarf der Busse der SBG ergibt sich aus den Potenzialanalysen in Kapitel 6.



Abb. 36 Schematische Darstellung des Aufbaus von Konzept 2.2

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Wasserstoffversorgung

Die Wasserstoffherzeugung erfolgt mittels einer PEM-Elektrolyseanlage. Die Leistung der Elektrolyseanlage ist dabei so dimensioniert, dass die Anlage im Dauerbetrieb (8760 h pro Jahr) die gesamte an der Tankstelle erforderliche Wasserstoffmenge erzeugen kann.

Die Stromversorgung der Elektrolyseanlage erfolgt über das öffentliche Stromnetz, eine eigene Stromerzeugung (z.B. mittels Photovoltaik) ist nicht vorgesehen.

Das entstehende Wasserstoffgas wird am Standort der Elektrolyse aufgereinigt und getrocknet. Mittels eines Mitteldruckverdichters wird der Gasdruck erhöht und das Gas anschließend im Massespeicher zwischengespeichert.

Wasserstofftankstelle

In diesem Konzept wird eine Tankstelle auf dem Betriebshof der SBG in der Robert-Bunsen-Straße in Freiburg berücksichtigt.

Die Wasserstofftankstelle besteht aus einem Massespeicher, in dem große Mengen Wasserstoffgas bei einem moderaten Druck gespeichert werden. Dieser Speicher dient der zeitlichen Entkoppelung von Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse und Wasserstoffverbrauch (durch Betankungen). Zusätzlich gibt es an der Tankstelle einen Hochdruck-Speicher (HD-Speicher), bei dem kleinere Mengen Wasserstoffgas bei hohem Druck für die nächste Betankung vorgehalten werden. Beide Speicher sind über einen Kompressor miteinander verbunden. Unterschreitet der Druck im HD-Speicher einen Schwellwert, entnimmt der Kompressor Wasserstoffgas aus dem Massespeicher, verdichtet dieses und befüllt damit den HD-Speicher. Sobald ein oberer Schwellwert erreicht ist, schaltet der Kompressor wieder aus.

Die eigentliche Betankung eines Omnibusses erfolgt durch ein Überströmen von gasförmigem Wasserstoff aus dem HD-Speicher in den Tank des Fahrzeugs. Dabei wird ein Druckgefälle zwischen dem HD-Speicher (höherer Druck) und dem Fahrzeugtank genutzt (geringerer Druck). Sobald der Fahrzeugtank eine obere Druckgrenze erreicht hat, wird die Betankung beendet.

H₂-Bedarf

Der Wasserstoffbedarf ergibt sich aus den Analysen in Kapitel 6. In diesem Konzept versorgt die Tankstelle das maximale Ausbaupotenzial an Wasserstoffbussen der SBG. Anhand realer Messdaten vergangener Betankungen wurde eine Betankungszeitreihe erstellt und für die Simulationen genutzt.

7.1.2.7 Konzept 3.1 - VAG

In diesem Konzept erfolgt die Wasserstoffversorgung ausschließlich für die Tankstelle der VAG (HRS1) mittels Anlieferung von grünem Wasserstoff durch Trailer von einem externen Erzeuger. Die Tankstelle ist auf dem Betriebshof des Busunternehmens VAG errichtet. Der Wasserstoffbedarf der Busse der VAG ergibt sich aus den Potenzialanalysen in Kapitel 6.



Abb. 37 Schematische Darstellung des Aufbaus von Konzept 3.1

Wasserstoffversorgung

Die Wasserstoffversorgung der Tankstelle erfolgt durch Zukauf von einem externen Erzeuger. In diesem Konzept wird ausschließlich mittels erneuerbarer Energien erzeugter Wasserstoff eingesetzt.

Die Belieferung der Tankstelle erfolgt mittels eines Trailers. Unabhängig von Tag und Uhrzeit liefert der Trailer immer dann Wasserstoff an die Tankstelle, wenn der Druck im Massespeicher unter einen Schwellwert fällt. Es wird immer die Menge einer ganzen Trailerfüllung angeliefert.

Wasserstofftankstelle

In diesem Konzept wird eine Tankstelle auf dem Betriebshof der VAG in der Besançonallee in Freiburg berücksichtigt.

Die Wasserstofftankstelle besteht aus einem Massespeicher, in dem große Mengen Wasserstoffgas bei einem moderaten Druck gespeichert werden. Dieser Speicher dient der zeitlichen Entkoppelung von Wasserstoffanlieferung mittels Trailer und Wasserstoffverbrauch (durch Betankungen). Zusätzlich gibt es an der Tankstelle einen Hochdruck-Speicher (HD-Speicher), bei dem kleinere Mengen Wasserstoffgas bei hohem Druck für die nächste Betankung vorgehalten werden. Beide Speicher sind über einen Kompressor miteinander verbunden. Unterschreitet der Druck im HD-Speicher einen Schwellwert, entnimmt der Kompressor Wasserstoffgas aus dem Massespeicher, verdichtet dieses und befüllt damit den HD-Speicher. Sobald ein oberer Schwellwert erreicht ist, schaltet der Kompressor wieder aus.

Die eigentliche Betankung eines Omnibusses erfolgt durch ein Überströmen von gasförmigem Wasserstoff aus dem HD-Speicher in den Tank des Fahrzeugs. Dabei wird ein Druckgefälle zwischen dem HD-Speicher (höherer Druck) und dem Fahrzeugtank genutzt (geringerer Druck). Sobald der Fahrzeugtank eine obere Druckgrenze erreicht hat, wird die Betankung beendet.

H₂-Bedarf

Der Wasserstoffbedarf ergibt sich aus den Analysen in Kapitel 6. In diesem Konzept versorgt die Tankstelle das maximale Ausbaupotenzial an Wasserstoffbussen der VAG Freiburg. Anhand realer Messdaten vergangener Betankungen wurde eine Betankungszeitreihe erstellt und für die Simulationen genutzt.

7.1.2.8 Konzept 3.2 - SBG

In diesem Konzept erfolgt die Wasserstoffversorgung ausschließlich für die Tankstelle der SBG (HRS2) mittels Anlieferung von grünem Wasserstoff durch Trailer von einem externen Erzeuger. Die Tankstelle ist auf dem Betriebshof des Busunternehmens SBG errichtet. Der Wasserstoffbedarf der Busse der SBG ergibt sich aus den Potenzialanalysen in Kapitel 6.



Abb. 38 Schematische Darstellung des Aufbaus von Konzept 3.2

Wasserstoffversorgung

Die Wasserstoffversorgung der Tankstelle erfolgt durch Zukauf von einem externen Erzeuger. In diesem Konzept wird ausschließlich mittels erneuerbarer Energien erzeugter Wasserstoff eingesetzt.

Die Belieferung der Tankstelle erfolgt mittels eines Trailers. Unabhängig von Tag und Uhrzeit liefert der Trailer immer dann Wasserstoff an die Tankstelle, wenn der Druck im

Massespeicher unter einen Schwellwert fällt. Es wird immer die Menge einer ganzen Trailerfüllung angeliefert.

Wasserstofftankstelle

In diesem Konzept wird eine Tankstelle auf dem Betriebshof der SBG in der Robert-Bunsen-Straße in Freiburg berücksichtigt.

Die Wasserstofftankstelle besteht aus einem Massespeicher, in dem große Mengen Wasserstoffgas bei einem moderaten Druck gespeichert werden. Dieser Speicher dient der zeitlichen Entkoppelung von Wasserstoffanlieferung mittels Trailer und Wasserstoffverbrauch (durch Betankungen). Zusätzlich gibt es an der Tankstelle einen Hochdruck-Speicher (HD-Speicher), bei dem kleinere Mengen Wasserstoffgas bei hohem Druck für die nächste Betankung vorgehalten werden. Beide Speicher sind über einen Kompressor miteinander verbunden. Unterschreitet der Druck im HD-Speicher einen Schwellwert, entnimmt der Kompressor Wasserstoffgas aus dem Massespeicher, verdichtet dieses und befüllt damit den HD-Speicher. Sobald ein oberer Schwellwert erreicht ist, schaltet der Kompressor wieder aus.

Die eigentliche Betankung eines Omnibusses erfolgt durch ein Überströmen von gasförmigem Wasserstoff aus dem HD-Speicher in den Tank des Fahrzeugs. Dabei wird ein Druckgefälle zwischen dem HD-Speicher (höherer Druck) und dem Fahrzeugtank genutzt (geringerer Druck). Sobald der Fahrzeugtank eine obere Druckgrenze erreicht hat, wird die Betankung beendet.

H₂-Bedarf

Der Wasserstoffbedarf ergibt sich aus den Analysen in Kapitel 6. In diesem Konzept versorgt die Tankstelle das maximale Ausbaupotenzial an Wasserstoffbussen der SBG Freiburg. Anhand realer Messdaten vergangener Betankungen wurde eine Betankungszeitreihe erstellt und für die Simulationen genutzt.

7.1.2.9 Konzept 4.1 - VAG

In diesem Konzept erfolgt die Wasserstoffversorgung ausschließlich für die Tankstelle der VAG (HRS1) mittels Anlieferung von grauem Wasserstoff durch Trailer von einem externen Erzeuger. Die Tankstelle ist auf dem Betriebshof des Busunternehmens VAG errichtet. Der Wasserstoffbedarf der Busse der VAG ergibt sich aus den Potenzialanalysen in Kapitel 6.



Abb. 39 Schematische Darstellung des Aufbaus von Konzept 4.1

Wasserstoffversorgung

Die Wasserstoffversorgung der Tankstelle erfolgt durch Zukauf von einem externen Erzeuger. In diesem Konzept wird ausschließlich sogenannter grauer Wasserstoff verwendet, der nicht mittels erneuerbarer Energien erzeugt wurde, sondern beispielsweise als Nebenprodukt in der chemischen Industrie anfällt.

Die Belieferung der Tankstelle erfolgt mittels eines Trailers. Unabhängig von Tag und Uhrzeit liefert der Trailer immer dann Wasserstoff an die Tankstelle, wenn der Druck im Massespeicher unter einen Schwellwert fällt. Es wird immer die Menge einer ganzen Trailerfüllung angeliefert.

Wasserstofftankstelle

In diesem Konzept wird eine Tankstelle auf dem Betriebshof der VAG in der Besançonallee in Freiburg berücksichtigt.

Die Wasserstofftankstelle besteht aus einem Massespeicher, in dem große Mengen Wasserstoffgas bei einem moderaten Druck gespeichert werden. Dieser Speicher dient der zeitlichen Entkoppelung von Wasserstoffanlieferung mittels Trailer und Wasserstoffverbrauch (durch Betankungen). Zusätzlich gibt es an der Tankstelle einen Hochdruck-Speicher (HD-Speicher), bei dem kleinere Mengen Wasserstoffgas bei hohem Druck für die nächste Betankung vorgehalten werden. Beide Speicher sind über einen Kompressor miteinander verbunden. Unterschreitet der Druck im HD-Speicher einen Schwellwert, entnimmt der Kompressor Wasserstoffgas aus dem Massespeicher, verdichtet dieses und befüllt damit den HD-Speicher. Sobald ein oberer Schwellwert erreicht ist, schaltet der Kompressor wieder aus.

Die eigentliche Betankung eines Omnibusses erfolgt durch ein Überströmen von gasförmigem Wasserstoff aus dem HD-Speicher in den Tank des Fahrzeugs. Dabei wird ein Druckgefälle zwischen dem HD-Speicher (höherer Druck) und dem Fahrzeugtank genutzt (geringerer Druck). Sobald der Fahrzeugtank eine obere Druckgrenze erreicht hat, wird die Betankung beendet.

H₂-Bedarf

Der Wasserstoffbedarf ergibt sich aus den Analysen in Kapitel 6. In diesem Konzept versorgt die Tankstelle das maximale Ausbaupotenzial an Wasserstoffbussen der VAG Freiburg. Anhand realer Messdaten vergangener Betankungen wurde eine Betankungszeitreihe erstellt und für die Simulationen genutzt.

7.1.2.10 Konzept 4.2 - SBG

In diesem Konzept erfolgt die Wasserstoffversorgung ausschließlich für die Tankstelle der SBG (HRS2) mittels Anlieferung von grauem Wasserstoff durch Trailer von einem externen Erzeuger. Die Tankstelle ist auf dem Betriebshof des Busunternehmens SBG errichtet. Der Wasserstoffbedarf der Busse der SBG ergibt sich aus den Potenzialanalysen in Kapitel 6.



Abb. 40 Schematische Darstellung des Aufbaus von Konzept 4.2

Wasserstoffversorgung

Die Wasserstoffversorgung der Tankstelle erfolgt durch Zukauf von einem externen Erzeuger. In diesem Konzept wird ausschließlich sogenannter grauer Wasserstoff verwendet, der nicht mittels erneuerbarer Energien erzeugt wurde, sondern beispielsweise als Nebenprodukt in der chemischen Industrie anfällt.

Die Belieferung der Tankstelle erfolgt mittels eines Trailers. Unabhängig von Tag und Uhrzeit liefert der Trailer immer dann Wasserstoff an die Tankstelle, wenn der Druck im Massespeicher unter einen Schwellwert fällt. Es wird immer die Menge einer ganzen Trailerfüllung angeliefert.

Wasserstofftankstelle

In diesem Konzept wird eine Tankstelle auf dem Betriebshof der SBG in der Robert-Bunsen-Straße in Freiburg berücksichtigt.

Die Wasserstofftankstelle besteht aus einem Massespeicher, in dem große Mengen Wasserstoffgas bei einem moderaten Druck gespeichert werden. Dieser Speicher dient der zeitlichen Entkoppelung von Wasserstoffanlieferung mittels Trailer und

Wasserstoffverbrauch (durch Betankungen). Zusätzlich gibt es an der Tankstelle einen Hochdruck-Speicher (HD-Speicher), bei dem kleinere Mengen Wasserstoffgas bei hohem Druck für die nächste Betankung vorgehalten werden. Beide Speicher sind über einen Kompressor miteinander verbunden. Unterschreitet der Druck im HD-Speicher einen Schwellwert, entnimmt der Kompressor Wasserstoffgas aus dem Massespeicher, verdichtet dieses und befüllt damit den HD-Speicher. Sobald ein oberer Schwellwert erreicht ist, schaltet der Kompressor wieder aus.

Die eigentliche Betankung eines Omnibusses erfolgt durch ein Überströmen von gasförmigem Wasserstoff aus dem HD-Speicher in den Tank des Fahrzeugs. Dabei wird ein Druckgefälle zwischen dem HD-Speicher (höherer Druck) und dem Fahrzeugtank genutzt (geringerer Druck). Sobald der Fahrzeugtank eine obere Druckgrenze erreicht hat, wird die Betankung beendet.

H₂-Bedarf

Der Wasserstoffbedarf ergibt sich aus den Analysen in Kapitel 6. In diesem Konzept versorgt die Tankstelle das maximale Ausbaupotenzial an Wasserstoffbussen der SBG Freiburg. Anhand realer Messdaten vergangener Betankungen wurde eine Betankungszeitreihe erstellt und für die Simulationen genutzt

7.2 Methodische Herangehensweise / KPI

Die Vergleichbarkeit und damit die Bewertung der in Kapitel 7.1 beschriebenen Konzepte erfolgt mittels verschiedener Kennzahlen (engl. Key Performance Indicator, KPI). Diese werden überwiegend mit Hilfe des Simulationstools berechnet (siehe Kapitel 7.3). Die KPI wurden in Abstimmung mit den assoziierten Partnern erarbeitet und spiegeln die relevanten Entscheidungsgrößen wider.

Die wichtigste Kenngröße sind die TCO (vgl. Kapitel 2.4), anhand derer sich die kilometerspezifischen Gesamtkosten der Konzepte miteinander vergleichen lassen. Zudem ist darüber ein Vergleich mit anderen Technologien, etwa den bestehenden Dieselantrieben, möglich.

Der Rat der Europäischen Union hat am 13.06.2019 eine Überarbeitung der *Clean Vehicles Directive* der EU beschlossen. Darin werden weitreichende Vorgaben für die Beschaffung von Fahrzeugen durch die öffentliche Hand in den Mitgliedsstaaten der EU gemacht. Demnach sind öffentliche Auftraggeber bei künftigen Ausschreibungen ab dem 01.08.2021 verpflichtet, eine gewisse Quote an „sauberen“ sowie an „emissionsfreien“ Fahrzeugen auszuschreiben. Für Omnibusse in Deutschland liegt diese Quote bis Ende 2025 bei mind. 45 % „sauberen“ Fahrzeugen (z.B. Biokraftstoffe) und davon mindestens die Hälfte „emissionsfrei“ (gemeint sind lokal emissionsfreie Fahrzeuge, also beispielsweise Wasserstoffbrennstoffzellen- und Batteriebusse). Diese Werte verschärfen sich bis Ende 2030 auf mind. 65 % „saubere“ Fahrzeuge, davon mindestens die Hälfte „emissionsfrei“.

Obwohl Wasserstoffbrennstoffzellenbusse gemäß dieser Definition, unabhängig von der Quelle des Wasserstoffs, als „emissionsfrei“ gelten, wird als weitere KPI der Anteil erneuerbarer Energien am genutzten Wasserstoff berechnet.

Als weitere KPI werden zusätzlich die Anzahl an Trailerfahrten am Standort der Elektrolyseanlage sowie auf dem jeweiligen Betriebshof sowie der Flächenbedarf für die Errichtung der Wasserstoffinfrastruktur auf den Betriebshöfen berechnet. Beides sind vor dem Hintergrund der bereits heute starken Flächenauslastung entscheidende Kriterien. Die Anzahl der Trailerfahrten wird mit Hilfe des Simulationsmodells bestimmt, der Flächenbedarf wird auf Basis von Vorarbeiten des Fraunhofer ISE und beteiligter Partner im Projekt Kopernikus P2X grob abgeschätzt. Auf eine detaillierte Berechnung wird verzichtet.

7.3 Simulation

Nachfolgend wird der Aufbau des Simulationsmodells sowie die verwendeten Eingangszeitreihen, Parameter, Annahmen und Randbedingungen beschrieben. Ebenso wird die Betriebsführung des Modells kurz erläutert.

 Konzepterstellung für eine
 Wasserstoffinfrastruktur im
 Großraum Freiburg (AP6)

7.3.1 Aufbau des Simulationsmodells

Die Simulation der technischen Anlagen (Wasserstofferzeugung und Tankstellen) erfolgt mit Hilfe des am Fraunhofer ISE selbst entwickelten Tools *H2ProSim* (Hydrogen Process Simulation Tool), welches in der Oberfläche Matlab/Simulink/Stateflow programmiert wurde. Die dynamische *Modellierung der Einzelkomponenten* (z.B. Elektrolyse, Speicher, Kompressor) basiert auf physikalischen Energie- und Massenbilanzen, die mit einer *technischen Betriebsführung* um physikalisch vorhandene Randbedingungen, wie An- und Abfahrvorgänge, ergänzt werden. Die auf diese Weise nachgebildete Power-to-Hydrogen-Anlage kann nun anhand beliebiger strom- und gaseitiger Anforderungsprofile um eine *Betriebsstrategie* erweitert werden. Dabei spielen ganz konkrete Randbedingungen, wie zeitlich aufgelöste Stromerzeugung und dynamischer Gasbedarf, eine Rolle und können einen erheblichen Einfluss auf die KPI ausüben.

Zur Ermittlung der Wasserstoffgestehungskosten LCOHy verfügt *H2ProSim* über eine zusätzliche Ebene, mit deren Hilfe die wirtschaftlichen Aspekte berücksichtigt werden können. Dieses *Kostenmodell* beinhaltet eine Vielzahl realer Kostenpunkte aus am Markt verfügbaren Komponenten, anhand derer letztlich die Gesamtkosten der Anlage über die Abschreibungsdauer errechnet werden können.

In diesem Projekt wurde zusätzlich die Berechnung der TCO implementiert und erstmalig eingesetzt. Die dabei berücksichtigten Annahmen und Randbedingungen sind in Kapitel 7.3.2 beschrieben.

Des Weiteren beinhaltet *H2ProSim* einen selbst entwickelten *Optimierungsalgorithmus*, der in diesem Projekt jedoch nicht zum Einsatz kommt.

In Abb. 41 ist der Aufbau und das Zusammenspiel der verschiedenen Ebenen in der Toolbox *H2ProSim* schematisch dargestellt.

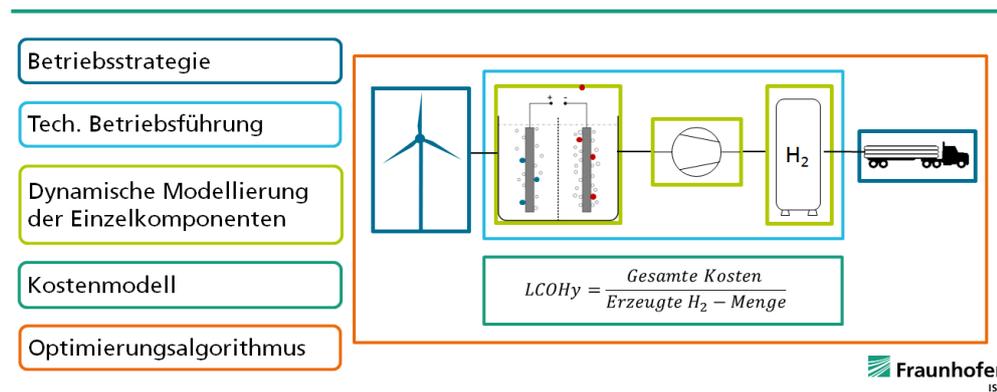


Abb. 41 Schematischer Aufbau der Toolbox *H2ProSim*

7.3.2 Annahmen und Randbedingungen

Nachfolgend sind, untergliedert nach technischer Simulation und Ökonomie, die verwendeten Annahmen und Randbedingungen aufgeführt.

7.3.2.1 Technische Simulation

Nachfolgend sind in tabellarischer Form die für die technische Konzeptbewertung verwendeten Parameter aufgeführt.

Strombereitstellung

| Konzept | Parameter | Wert | Einheit |
|---------------|----------------------------|-------|---------|
| 1.1.1 / 1.1.2 | Leistung PV-Kraftwerk | 2.556 | kW |
| alle | Wirkungsgrad Gleichrichter | 98 | % |

 Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Tab. 07 Techn. Annahmen - Strombereitstellung

Wasserstoffherzeugung und -bereitstellung

Die Leistung der Elektrolyseure ist in allen Konzepten so ausgelegt, dass die Anlage 24/7 und somit 8760 h/a dauerhaft bei Nennleistung betrieben wird. Stillstandszeiten (z.B. für Wartungen) sind nicht berücksichtigt.

Hierbei handelt es sich um eine erste Annahme, die Betriebsweise der Elektrolyse wurde nicht optimiert.

Die Fördermenge des MD-Verdichters wurde so ausgelegt, dass er die in der Elektrolyse entstehende Wasserstoffmenge in jedem Fall in den Trailer verdichten kann. Eine optimierte Auslegung in Abhängigkeit der tatsächlichen Elektrolyseleistung erfolgte nicht.

Tab. 08 Techn. Annahmen - Wasserstoffherzeugung und -bereitstellung

| Konzept | Parameter | Wert | Einheit |
|--------------|----------------------------|-------|---------|
| 1.1.1, 1.1.2 | Leistung Elektrolyseanlage | 2.556 | kW |
| 2.1 | Leistung Elektrolyseanlage | 1.328 | kW |
| 2.2 | Leistung Elektrolyseanlage | 1.229 | kW |
| 1.1.1, 1.1.2 | Anzahl MD-Verdichter | 1 | Stück |
| 1.1.1, 1.1.2 | Fördermenge MD-Verdichter | 61,2 | kg/h |

Wasserstofftransport

- Es wird angenommen, dass zwei Trailer von einem Fahrer bewegt werden. Einer der Trailer steht somit immer zum Beladen an der Elektrolyseanlage.

| Konzept | Parameter | Wert | Einheit |
|--------------|---|-----------|---------|
| 1.1.1, 1.1.2 | Anzahl Trailer | 2 | Stück |
| 1.1.1, 1.1.2 | Befülldauer Trailer | 11 | Stunden |
| 1.1.1, 1.1.2 | Entleerungsdauer Trailer | 0,5 | Stunden |
| 1.1.1, 1.1.2 | Fahrdauer zwischen Erzeugung und Tankstelle | 0,5 | Stunden |
| 1.1.1, 1.1.2 | Druckgrenzen Trailer | 250...500 | bar |

Tab. 09 Techn. Annahmen - Wasserstofftransport

Wasserstofftankstellen

- Aufgrund der geringen Betankungsgeschwindigkeit ist keine Vorkühlung des Wasserstoffs an der Tankstelle berücksichtigt
- Zur Vereinfachung wird angenommen, dass jede Tankstelle lediglich über einen Dispenser verfügt. Dies hat keine Auswirkungen auf den Betrieb der Tankstelle (z.B. Energieverbräuche) aber auch die Auslegung einzelner Komponenten. Vor allem Hochdruckspeicher und Hochdruckverdichter würden an einer realen Tankstelle mit mehreren parallel arbeitenden Dispensern vermutlich größer ausgelegt werden. Im Falle einer Detailauslegung einer Tankstelle auf einem Betriebshof ist dies zu berücksichtigen.

 Konzepterstellung für eine
 Wasserstoffinfrastruktur im
 Großraum Freiburg (AP6)

| Konzept | Parameter | Wert | Einheit |
|---------|----------------------------|-----------|---------|
| VAG | Kapazität Massespeicher | 76 | kg |
| SBG | Kapazität Massespeicher | 142,5 | kg |
| alle | Druckgrenzen Massespeicher | 50...200 | bar |
| VAG | Kapazität HD-Speicher | 12 | kg |
| SBG | Kapazität HD-Speicher | 6 | kg |
| alle | Druckgrenzen HD-Speicher | 350...500 | bar |
| Alle | Anzahl HD-Verdichter | 1 | Stück |
| Alle | Fördermenge HD-Verdichter | 160 | kg/h |
| Alle | Anzahl Dispenser | 1 | Stück |
| Alle | Betankungsgeschwindigkeit | 3,6 | kg/h |

Tab. 10 Techn. Annahmen - Wasserstofftankstellen

Brennstoffzellenbusse

In diesem Projekt wird der Wasserstoffbedarf der Fahrzeuge anhand eines durchschnittlichen Wasserstoffverbrauchs von 9,0 kg / 100 km berechnet. Dieser wird für alle Umläufe angenommen und in der Potenzialerhebung ggf. durch Einfluss von Steigungen und Klimatisierung des Fahrgastraums angepasst. Ein umlaufspezifischer Verbrauch wird in diesem Projekt nicht berücksichtigt.

Tab. 11 Techn. Annahmen – BZ-Busse

| Konzept | Parameter | Wert | Einheit |
|---------|-----------|------|-------------|
| alle | Verbrauch | 9,0 | kg / 100 km |

Flächenbedarf der Onsite-Tankstelle und Onsite-Elektrolyse

Die Bestimmung des Footprints der Onsite-Anlagen, die letztlich auf den Betriebshöfen der VAG und SBG Platz finden sollen, erfolgt anhand einer vergleichbaren Bewertung in der Literatur.

Die Bewertung der Größe der Elektrolyse erfolgt anhand der Erfahrungen aus der Besichtigung zahlreicher reeller Anlagen mit den in der nachfolgenden Tab. 12 dargestellten Annahmen.

| Komponente | Flächenbedarf in m ² | Zusätzlich nötige |
|------------|---------------------------------|-------------------|
|------------|---------------------------------|-------------------|

| | | Freiflächen in m ² |
|---|-----|-------------------------------|
| Elektrolyseur inkl. Leistungselektronik | 30 | 30 |
| MD-Verdichter | 30 | 30 |
| Trailerabfüllstation | 130 | 70 |

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Tab. 12 Abschätzung des Flächenbedarf eine Onsite-Elektrolyseanlage

Bei Busemeyer et al. [6] wurde der Platzbedarf einer LOHC-basierten PKW-Tankstelle bestimmt. Da einige der Komponenten so ebenfalls bei Bus-Tankstellen verwendet werden, sind nachfolgend die Annahmen aufgelistet.

| Komponente | Flächenbedarf in m ² | Zusätzlich nötige Freiflächen in m ² |
|---------------------------------------|---------------------------------|---|
| Massespeicher | 2,5 | 8,8 |
| HD-Verdichter | 60 | 120 |
| HD-Speicher inkl. Regelstrecke | 15 | 34,5 |
| Dispenser (inkl. Stellfläche Omnibus) | 345 | keine |

Tab. 13 Abschätzung des Flächenbedarfs der Tankstelle in Konzept

In Abb. 42 ist beispielhaft der Footprint einer großen LOHC-basierten Wasserstofftankstelle für PKW dargestellt, wie sie im Projekt Kopernikus LOHC [6] entworfen wurde.

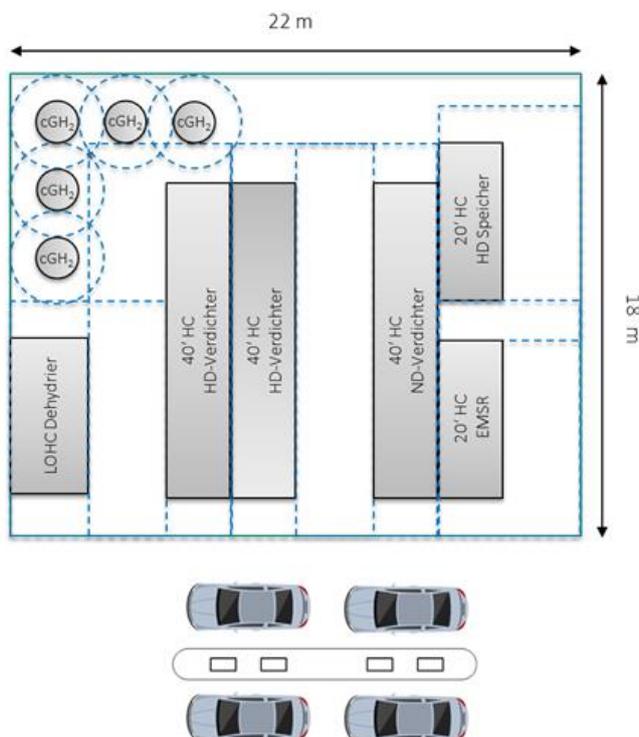


Abb. 42 Beispielhafte Darstellung des Footprints einer Wasserstofftankstelle mit LOHC-basierte Anlieferung für PKW (Quelle: [6])

7.3.2.2 Ökonomie - Berechnung LCOHy und TCO

Nachfolgend sind in tabellarischer Form die für die Berechnung der TCO verwendeten Parameter aufgeführt.

Finanzmathematische Werte

| Parameter | Wert | Einheit |
|---------------------------|------|---------|
| Kalkulatorischer Zinssatz | 3,0 | % |
| Abschreibungsdauer | 20 | a |

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Tab. 14 Ökon. Annahmen – Finanzmathematische Werte

Strombereitstellung

Es ist zu berücksichtigen, dass hier keine Kosten für einen Wechselrichter bzw. Gleichrichter für den Netzanschluss und keine Netzanschlussgebühren berücksichtigt wurden.

| Parameter | Wert | Einheit |
|------------------------------|------|---------|
| PV-Kraftwerk Investition | 350 | €/kWp |
| PV-Kraftwerk Betrieb/Wartung | 1 | %/a |
| PV-Kraftwerk Lebensdauer | 20 | a |

Tab. 15 Ökon. Annahmen - Strombereitstellung

Wasserstofferzeugung und -bereitstellung

| Parameter | Wert | Einheit |
|---|---------|---------|
| Elektrolyse Investition | 1200 | €/kW |
| Elektrolyse Betrieb/Wartung | 2 | %/a |
| Elektrolyse Lebensdauer | 20 | a |
| Elektrolyse Reinvestition Stack | 300 | €/kW |
| Elektrolyse Zeitpunkt der Reinvestition | 10 | a |
| MD-Verdichter Investition | 934.000 | € |
| MD-Verdichter Betrieb/Wartung | 2 | %/a |
| MD-Verdichter Lebensdauer | 20 | a |
| Gebäude Investition | 225.000 | € |
| Gebäude Betrieb/Wartung | 2 | %/a |
| Gebäude Lebensdauer | 30 | a |
| Engineering | 15 | % CAPEX |

Tab. 16 Ökon. Annahmen - Wasserstofferzeugung und -bereitstellung

Wasserstofftransport

| Parameter | Wert | Einheit |
|-------------------------|-------------|----------------|
| Trailer Investition | 450.000 | € |
| Trailer Betrieb/Wartung | 3 | %/a |
| Kosten Fahrer | 80.000 | €/a |
| Trailer Lebensdauer | 15 | a |

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Tab. 17 Ökon. Annahmen - Wasserstofftransport

Wasserstofftankstellen

| Parameter | Wert | Einheit |
|-----------------------------------|---------------|----------------|
| Strombezugskosten Tankstelle | 120 | €/MWh |
| EEG-Umlage | 70 | €/MWh |
| Reduzierte EEG-Umlage (> 1 GWh/a) | 40 % * 70 | €/MWh |
| HD-Verdichter Investition | 1,27 | Mio. € |
| HD-Verdichter Betrieb/Wartung | 0,02 * Invest | %/a |
| HD-Verdichter Lebensdauer | 20 | a |
| HD-Speicher Investition | 1000 | €/kg |
| HD-Speicher Betrieb/Wartung | 1 | %/a |
| HD-Speicher Lebensdauer | 20 | a |
| Massespeicher Investition | 650 | €/kg |
| Massespeicher Betrieb/Wartung | 1 | %/a |
| Massespeicher Lebensdauer | 20 | a |
| Dispenser Investition | 30.000 | € |
| Dispenser Betrieb/Wartung | 1 | %/a |
| Dispenser Lebensdauer | 20 | a |
| Engineering einmalig | 15 | % CAPEX |

Tab. 18 Ökon. Annahmen - Wasserstofftankstellen

Brennstoffzellenbusse

| Parameter | Wert | Einheit |
|---------------------------|-------------|---------|
| Investitionskosten BZ-Bus | 600.000 | € |
| Lebensdauer | 14 | a |
| Betriebskosten | 3 % * CAPEX | €/a |
| Lohn Fahrer | 80.000 | €/a |
| Fahrstrecke | 60.000 | km/a |

Konzepterstellung für eine
Wasserstoffinfrastruktur im
Großraum Freiburg (AP6)

**Tab. 19 Ökon. Annahmen –
BZ-Busse**

7.3.3 Eingangszeitreihen

In diesem Projekt sind für die Konzeptbewertung unterschiedliche Eingangszeitreihen für die Simulation verwendet worden. Diese sind nachfolgend beschrieben.

Photovoltaik

Die Zeitreihe der photovoltaischen Stromerzeugung entstammt einem PV-Ertragsgutachten für eine Anlage mit einer Leistung von 2,5 MW installierter Leistung am Standort Offenburg. Die Module der Anlage sind nach Süden ausgerichtet und mit einem Anstellwinkel von 20° aufgeständert. Die Berechnung dieser Zeitreihe basiert auf realen Einstrahlungswerten über einen Zeitraum der letzten 20 Jahren.

EEX-Preise Day-Ahead

Für die Berechnung der Strombezugskosten aus dem öffentlichen Netz wurden die Day-Ahead-Preise der Strombörse EEX des Jahres 2016 genutzt. Diese Daten sind als Transparenzdaten der Übertragungsnetzbetreiber frei im Internet verfügbar. Daten neuerer Jahre liegen leider nicht vor. Da die Strombörsenpreise nicht nur jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen sondern auch von Jahr zu Jahr erheblich variieren (teils bis zu Faktor zwei), können sich die Wasserstoffgestehungskosten, für deren Berechnung diese Zeitreihe im Projekt eingesetzt wird, in der Realität von denen Ergebnissen in diesem Projekt unterscheiden.

Anteil erneuerbarer Energien am Strommix Deutschland

Die zeitlich aufgelöste Zusammensetzung des deutschen Strommixes wird ebenfalls über Transparenzdaten der Übertragungsnetzbetreiber veröffentlicht und wurde in aufbereiteter Form der Website energy-charts.de entnommen.

Diese Daten werden im Projekt verwendet, um in den Konzepten, in denen sowohl PV-Strom als auch zertifizierter Grünstrom bezogen werden, den tatsächlichen Anteil der genutzten erneuerbaren Energien zu berechnen.

Es ist dabei zu beachten, dass es sich bei dieser Zeitreihe um gemittelte Werte über das gesamte Netzgebiet der Bundesrepublik Deutschland handelt. Eine regionale Verteilung von erneuerbaren Energien und deren damit verbundene tatsächliche physikalische Nutzung in der Elektrolyseanlage können nicht berücksichtigt werden.

Wasserstoffbedarf VAG

Der Wasserstoffbedarf der VAG wurde anhand realer Messdaten der Tankstelle auf dem Betriebshof der VAG erstellt. Die Messdaten wurden im Zeitraum vom 01.11.2019 bis 08.11.2019 erhoben.

Die Messdaten zeigte einzelne Betankungsvorgänge inkl. eines Datums- und Zeitstempels sowie der zugehörigen Tankmenge an Dieselmotorkraftstoff. Eine Zuordnung des Tankvorgangs zu einem einzelnen Umlauf war nicht möglich.

Diese Betankungszeitreihe wurde für die Simulation in eine Zeitreihe bestehend aus 0 und 1 übersetzt, um im Modell selbst die Betankungsgeschwindigkeit und Menge variieren zu können. Aus den Messdaten selbst wurde dazu in einem ersten Schritt ein durchschnittlicher Verbrauch der Busse von 38 L pro 100 km bestimmt. Im zweiten Schritt wurde die Betankungsmenge über den Verbrauch in eine Reichweite in Kilometern umgerechnet, die dem Bus über die Betankung zugeführt wurde. In einem dritten Schritt konnte nun anhand des mittleren Wasserstoffbedarf von Brennstoffzellenbussen von 9,0 kg pro 100 km (vergleiche Kapitel 2.3.1) die Wasserstoffmenge errechnet werden, die nötig wäre, um die gleiche Reichweite zu erbringen, wie die getankte Dieselmenge.

Mit Hilfe der durchschnittlichen Betankungsgeschwindigkeit beim in diesem Projekt verwendeten „normal refuelling“ von 3,6 kg/min (vgl. [35]) ergibt sich daraus eine Betankungsdauer für die Wasserstoffbetankung in Minuten, welche im letzten Schritt in eine Zeitreihe aus 0 und 1 übertragen wurde. So bedeutet beispielsweise eine Betankungsmenge von 36 kg Wasserstoff eine Betankungsdauer von 10 Minuten, sodass in der finalen Zeitreihe an dieser Stelle an zehn aufeinander folgenden Minuten eine 1 eingetragen wird.

So komplex diese Vorgehensweise erscheinen mag, ermöglicht sie doch nachträglich eine einfache Anpassung des durchschnittlichen Verbrauchs der betrachteten Fahrzeuge und eine Änderung der Betankungsgeschwindigkeit, sollte etwa „fast refuelling“ (doppelte Betankungsgeschwindigkeit) verwendet werden.

Wasserstoffbedarf SBG

Der Wasserstoffbedarf der SBG wurde anhand realer Messdaten der Tankstelle auf dem Betriebshof der SBG erstellt. Die Messdaten wurden im Zeitraum vom 01.10.2019 bis 30.10.2019 erhoben.

Die Erstellung der Zeitreihen aus den Messwerten erfolgte analog zum Wasserstoffbedarf der VAG.

Umgebungstemperatur

Zur Berechnung physikalischer Größen, wie etwa Speicherdruck oder –füllstand, wurde innerhalb des Simulationsmodells die Umgebungstemperatur verwendet. Bezugszeitraum war hier das Jahr 2016.

7.4 Ergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Konzeptbewertung für die Realisierung eines ersten sowie des maximalen Ausbaupotenzials von Wasserstoffbussen im Großraum Freiburg beschrieben.

Betankungsvorgänge SBG im Großraum Freiburg gesamt:

- Gesamt: 242
- Keine Betankung: 59
- Freiburg: 124
- Furtwangen: 21
- Aral Neustadt: 22
- Shell Herbolzheim: 3
- Aral Prechtal: 6
- Aral Todtnau: 2
- Shell Lenzkirch: 3
- Shell Oberhöllsteig: 2

Von den 155 Umläufen, die nicht am Betriebshof FR stationiert sind, tanken:

- Keine Betankung: 39
- Freiburg: 59
- Furtwangen: 21
- Aral Neustadt: 22
- Shell Herbolzheim: 3
- Aral Prechtal: 4
- Shell Lenzkirch: 3
- Shell Oberhöllsteig: 2

 Konzepterstellung für eine
 Wasserstoffinfrastruktur im
 Großraum Freiburg (AP6)

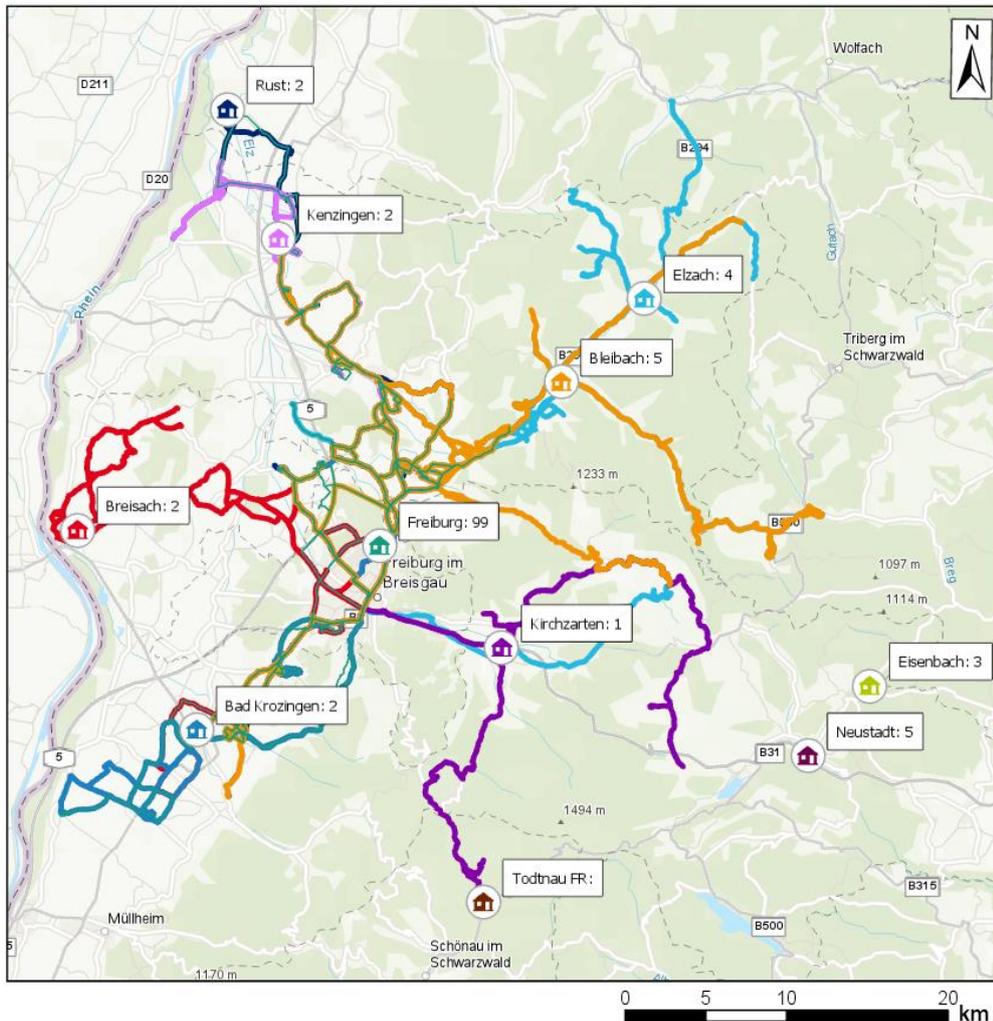


Abb. 43 Betriebshöfe der SBG im Großraum Freiburg

7.4.1 Erste Ausbaustufe

Für eine erste Einführung von Bussen wird eine geringe Anzahl Busse bei SBG und ggf. auch VAG vorgeschlagen, welche anfangs vor allem an öffentlichen PKW-Wasserstofftankstellen betankt werden. Diese Lösung kann für Freiburg vermutlich 2 bis 10 der insgesamt 44 möglichen H₂-Busse an 2 bis 3 öffentlichen Tankstellen versorgen und ist ein kosteneffizienter erster Schritt, der auch zusätzlich die Einführung einer Wasserstoff-PKW-Infrastruktur begünstigt, wemgleich möglicherweise eine Anpassung der Umläufe und Betriebsabläufe für einen kleinen Teil der Umläufe nötig

werden könnte. Die Bereitschaft hierzu wurde bspw. durch die SBG bereits kommuniziert, wobei zu klären ist, wie viele Fahrzeuge wirklich aufgrund der notwendigen Anpassung der Betriebsabläufe außerhalb getankt werden können. Es ist zu erwähnen, dass die ASF Freiburg derzeit in Verhandlungen mit der H2Mobility über die Errichtung einer solchen Tankstelle nach dem gleichem Modell (Mitnutzung einer 700 bar-PKW-H₂-Tankstelle) steht und vermutlich nur eine limitierte Anzahl der für Deutschland insgesamt maximal 400 Wasserstoff-PKW-Tankstellen durch die H2Mobility in Freiburg gebaut wird. Das hier vorgeschlagene Modell zur Mitnutzung der ersten BZ-Busse von öffentlichen PKW-Tankstellen wird also vermutlich eine Maximalgrenze erreichen und kann mit der ASF konkurrieren.

Konzepterstellung für eine
Wasserstoffinfrastruktur im
Großraum Freiburg (AP6)

Da die H2Mobility ausschließlich PKW-Tankstellen mit 700 bar-Technik errichtet, welche sich nicht für die Betankung von Busse eignet, ist eine Erweiterung von PKW-Tankstellen erforderlich.

Die H2Mobility hat hierzu ein Konzept erarbeitet, welches eine Beteiligung an den Investitionskosten für die Errichtung der 350 bar-Technik in Höhe von 700.000 € (eine 50 prozentige Förderung ist möglich) der Unternehmen vorsieht, die eine 350 bar-Betankungstechnik wünschen. Die Förderung würde dabei durch die H2Mobility beantragt.

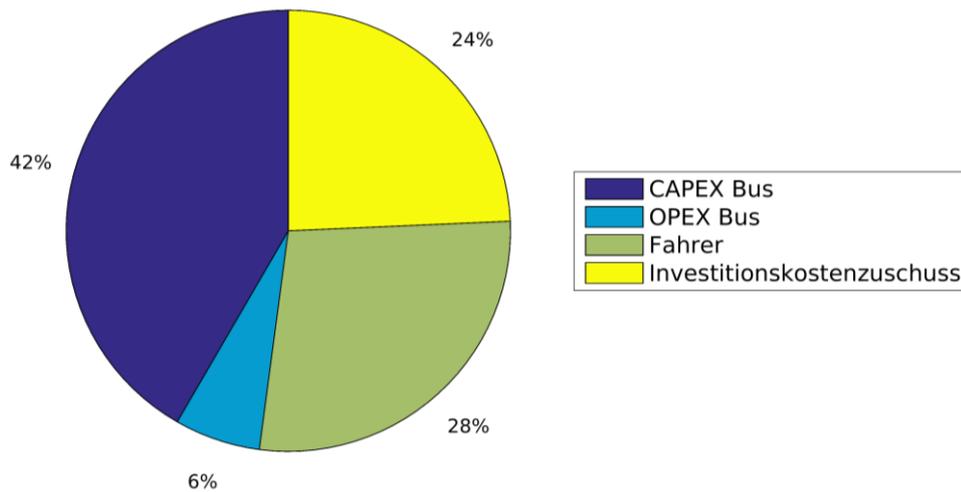
Alternativ zur Kostenbeteiligung besteht die Möglichkeit, eine Wasserstoff-Abnahmeverpflichtung (Take or Pay) zu vereinbaren und auf diese Weise über einen gewissen Zeitraum die Mehrkosten zu refinanzieren.

Laut H2Mobility könnten an einer so umgebauten Tankstelle bis zu 5 Busse täglich tanken.

Ein weiterer positiver Aspekt der Kombination von PKW- und Bustankstelle ist, dass der Betrieb und die Wartung vollständig durch die H2Mobility übernommen werden. Für den Busbetreiber bedeutet dies ein geringes Risiko und ermöglicht einen niederschweligen Einstieg in die Technologie.

Zur Bewertung dieses Konzepts für eine erste Ausbaustufe wurde eine vereinfachte TCO-Berechnung vorgenommen. Darin berücksichtigt sind die Kosten für Anschaffung und Betrieb des Busses, Lohnkosten eines Fahrers, die Investitionskostenbeteiligung für die Errichtung einer Tankstelle in Höhe von 350.000 € sowie ein Wiederverkauf des Busses nach Ablauf einer Testphase von einem Jahr zu 80 % des Anschaffungspreises. Die TCO in diesem Konzept belaufen sich auf 4,80 €/km, die Aufschlüsselung ist in Abb. 44 zu sehen.

Unter der Annahme eines Wiederkaufspreises in Höhe von 90 % des Anschaffungspreises, sinkt der Anteil der CAPEX Bus an den TCO auf 26 % und die TCO auf 3,80 €/km.



Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Abb. 44 TCO der ersten Ausbaustufe (Konzept 0)

Unter der Annahme, dass der Bus über eine Dauer von zwei Jahren betrieben wird und anschließend dennoch für 80 % des Anschaffungspreises verkauft wird, sinken die TCO sogar auf 3,22 €/km.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Nutzung einer kombinierten PKW-Bus-Tankstelle in Koordination der H2Mobility gerade in der Einstiegsphase für Wasserstoffbusse eine kostengünstige Möglichkeit zur Betankung der Busse ist. Da Betrieb und Wartung der Tankstelle ebenfalls durch die H2Mobility abgedeckt würde, ist das Risiko vergleichsweise gering und ein Aufstieg hin zu einer größeren, möglicherweise eigenen Tankstelle problemlos möglich.

7.4.2 Finale Ausbaustufe

Nachfolgend sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Konzepte für die finale Ausbaustufe des max. Potenzials an Wasserstoffbussen im Großraum Freiburg dargestellt.

Konzepterstellung für eine
Wasserstoffinfrastruktur im
Großraum Freiburg (AP6)

7.4.2.1 Wasserstofftankstelle der VAG

In diesem Projekt sind zwei Tankstellenkonzepte und –dimensionierungen erarbeitet worden, je eines für den Betriebshof der VAG und der SBG. Da der Aufbau der Tankstellen in allen Konzepten immer gleich ist und sich lediglich zwischen der VAG und SBG unterscheidet, werden nachfolgend die Ergebnisse vorgestellt, welche speziell die Tankstelle auf dem Betriebshof der VAG betreffen. Diese Ergebnisse gelten für alle Konzepte, in denen eine VAG-Tankstelle berücksichtigt wurde.

Die Ergebnisse zu der Tankstelle auf dem Betriebshof der SBG sind im nachfolgenden Kapitel 7.4.2.2 beschrieben.

Technische Ergebnisse

Verhalten der Tankstelle bei Betankungen

Das Verhalten des Hochdruckteils der Wasserstofftankstelle am Standort der VAG über ein Jahr ist in Abb. 45 dargestellt. Zusätzlich zeigt Abb. 45 im Detail die erste Woche des Betrachtungsjahres.

In Blau ist jeweils der Speicherdruck in bar im Hochdruckspeicher, in Orange die Wasserstoffabgabemenge in kg/h an der Tankstelle dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass der Druck im HD-Speicher über das gesamte Jahr zwischen ca. 370 bar und 500 bar schwankt. Insbesondere in den Sommermonaten wird die obere Druckgrenze sogar überschritten und der Druck steigt auf bis zu 530 bar. Der Grund liegt darin, dass der Speicher bis auf 500 bar gefüllt werden. Steigt nun im Laufe eines Tages die Temperatur an, erwärmt sich der Speicher und in der Folge dehnt sich das Gas im Speicher aus. Findet gleichzeitig über einen längeren Zeitraum keine Betankung statt, kann der Druck nicht abgebaut werden und steigt daher über den oberen Schwellwert an. Dies gilt insbesondere an den Vormittagen, da dort nur wenige Betankungen stattfinden (vgl. orangefarbene Kurve in Abb. 45).

Grundsätzlich kann anhand des Speicherdrucks sehr gut der wöchentlich wiederkehrende Betankungszyklus abgelesen werden. Vor allem an Samstagen und Sonntagen sinkt die Betankungsmenge und der Speicherdruck bleibt infolge dessen bei ca. 500 bar.

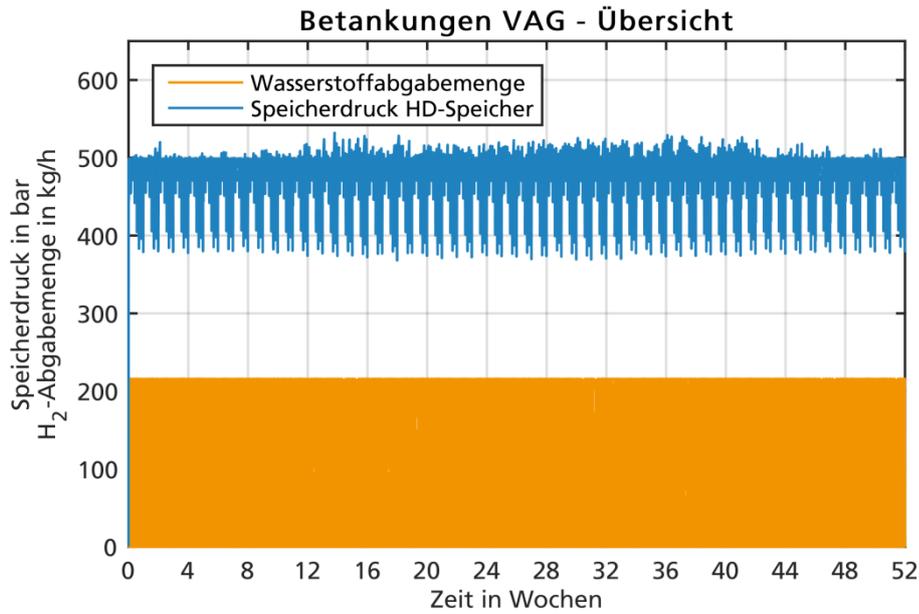


Abb. 45 Verhalten der HRS-VAG bei Betankungen (Übersicht)

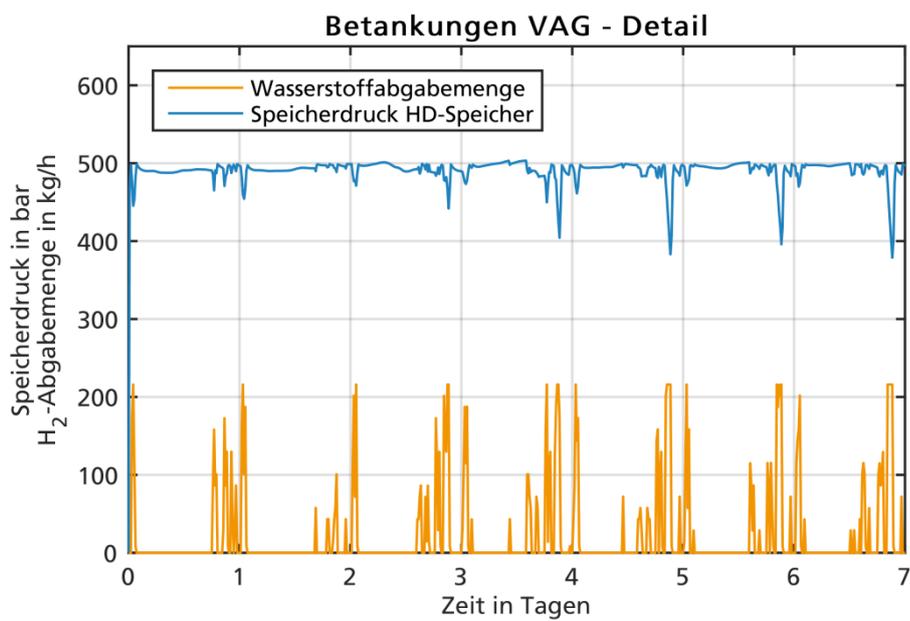


Abb. 46 Verhalten der HRS-VAG bei Betankungen (Detail)

Flächenbedarf der Wasserstoffanlagen

Der Platzbedarf der Wasserstofftankstelle und auch einer möglichen Onsite-Elektrolyse sind entscheidende Kennzahlen bei der Entscheidung einer etwaigen Umsetzung. Da das Platzangebot auf den Betriebshöfen der VAG und SBG sehr knapp ist und die vorhandene Fläche bereits heute nahezu vollständig genutzt wird, ist eine Investitionsentscheidung auch vom Flächenbedarf abhängig.

In den nachfolgenden Tabellen Tab. 20 und Tab. 21 ist die Berechnung des erforderlichen Flächenbedarfs für den Betriebshof der VAG aufgeführt.

| Komponente | Flächenbedarf in m ² | Zusätzlich nötige Freiflächen in m ² |
|---|---------------------------------|---|
| Elektrolyseur inkl. Leistungselektronik | 30 | 30 |
| MD-Verdichter | 30 | 30 |
| SUMME | 60 | 60 * 0,8 = 48 |

Tab. 20 Abschätzung des Flächenbedarfs der Onsite-Elektrolyseanlage der VAG

Aufgrund etwaiger Überschneidungen der Freiflächen (vgl. Kapitel 7.2) wird angenommen, dass nur 80 % der hier veranschlagten Freiflächen tatsächlich benötigt werden. Die Errichtung einer Onsite-Elektrolyseanlage am Standort der VAG erfordert somit eine freie Fläche von etwa 108 m². Es ist zu beachten, dass diese Fläche im Rahmen einer detaillierten Auslegung der Anlage zu überprüfen ist.

| Komponente | Flächenbedarf in m ² | Zusätzlich nötige Freiflächen in m ² |
|---------------------------------------|---------------------------------|---|
| Massespeicher | 1 * 2,5 | 1 * 8,8 |
| HD-Verdichter | 1 * 60 | 1 * 120 |
| HD-Speicher inkl. Regelstrecke | 2 * 15 | 2 * 34,5 |
| Dispenser (inkl. Stellfläche Omnibus) | 0 * 345 | keine |
| SUMME | 92,5 | 197,8 * 0,8 = 158,2 |

Tab. 21 Abschätzung des Flächenbedarfs der Tankstelle der VAG

Auch für die Freiflächen der Tankstelle wurde eine Überschneidung von 20 % angenommen, sodass tatsächlich nur 80 % der hier veranschlagten Freifläche benötigt werden. Die Errichtung einer Tankstelle am Standort der VAG Freiburg erfordert somit eine Fläche von 250,7 m².

Der Flächenbedarf des Dispensers wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da es sich hierbei um den Bedarf der finalen Ausbaustufe handelt. Es wird daher angenommen, dass der Dispenser anstelle der bisherigen Zapfsäulen für Dieselmotorkraftstoff errichtet wird und somit kein zusätzlicher Platzbedarf erforderlich ist. Während einer möglichen Übergangszeit, in der sowohl eine Diesel- als auch eine Wasserstofftankstelle auf dem Betriebshof installiert sind, wäre der Flächenbedarf jedoch zu berücksichtigen.

In Summe wird für die Errichtung einer Onsite-Elektrolyse sowie einer Wasserstofftankstelle zur Versorgung des maximalen Potenzials an Wasserstoffbussen der VAG eine Fläche von rund. $(60 + 48 + 92,5 + 158,2) \text{ m}^2 = 358,7 \text{ m}^2$ benötigt.

Ökonomische Ergebnisse

Aufgrund der identischen Auslegung der Wasserstofftankstelle der VAG in allen Konzepten, sind auch die Wasserstoffgestehungskosten der Wasserstofftankstelle für alle Konzepte gleich. Exemplarisch werden hier die Ergebnisse des Konzepts 2.1 vorgestellt, die somit auch für die Konzepte 1.1.1, 1.2.1, 3.1 und 4.1 gelten.

Die LCOHy der Wasserstoffherzeugung werden separat im jeweiligen Konzept beschrieben.

Berechnung der spezifischen Kosten der Tankstelle VAG

Nachfolgend werden die spezifischen Kosten der Tankstelle VAG beschrieben. Deren Einfluss auf die TCO des jeweiligen Konzepts findet sich in den Ergebniskapiteln des jeweiligen Konzepts und wird nicht hier beschrieben.

Die spezifischen Kosten der Tankstelle VAG je vertanktem Kilogramm Wasserstoff betragen unabhängig vom betrachteten Konzept 1,31 €/kg.

In Abb. 47 sind die spezifischen Kosten der Tankstelleninfrastruktur der VAG nach Komponenten aufgeschlüsselt. Die Abbildung gibt den prozentualen Anteil der Kosten jeder Komponente pro vertanktem Kilogramm Wasserstoff wieder. Eine Komponente beinhaltet dabei sowohl die Investitionskosten (CAPEX) als auch die Betriebs- und Wartungskosten (OPEX). Die Stromkosten sowie dafür anfallende Umlagen und Steuern sind separat aufgeführt.

Es ist zu erkennen, dass die Komponente Hochdruckverdichter (HP Compressor) mit 41 % den höchsten Anteil an den spez. Kosten der Tankstelle hat, gefolgt vom Mitteldruckspeicher (H₂-Storage 200 bar) und dem Hochdruckspeicher (H₂-Storage 500 bar). Der Einfluss der Kosten durch den Dispenser ist mit unter einem Prozent vernachlässigbar klein.

Relevante Kosten entstehen durch den Strombezug (12 %) sowie durch die zugehörigen Steuern und Umlagen (Taxes / Fees) mit 7 %. Kosten für das Engineering der Tankstelle haben einen Anteil von 9 %.

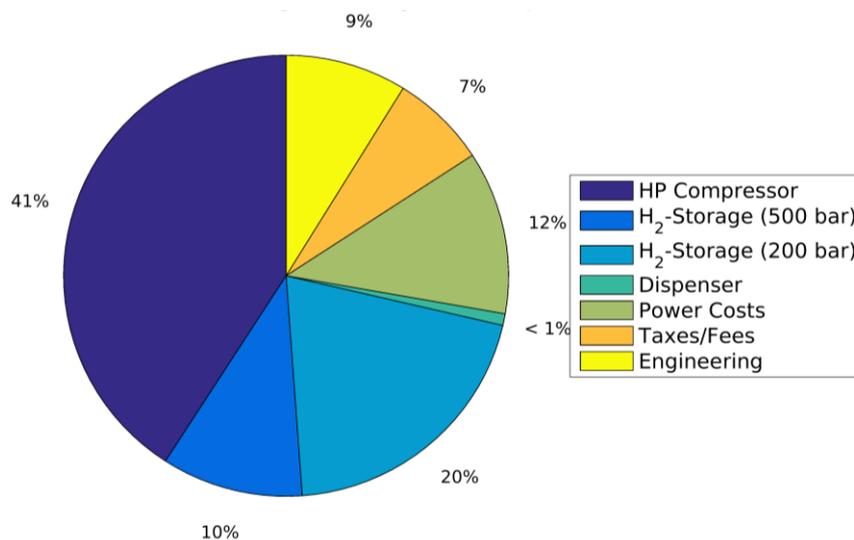


Abb. 47 Spezifische Kosten der Wasserstofftankstelle VAG nach Komponenten (hier am Beispiel von Konzept 2.1)

In einer anderen Darstellung der gleichen Ergebnisse sind in Abb. 48 die spezifischen Kosten nach Kostengruppe aufgeschlüsselt. Es ist zu erkennen, dass die Investitionskosten für die Errichtung der Tankstelle mit 68 % den bei weitem größten Anteil an den spez. Kosten haben. Die Strombezugskosten inkl. Steuern und Umlagen haben mit insgesamt 19 % den zweitgrößten Anteil, OPEX haben einen Anteil von 13 %.

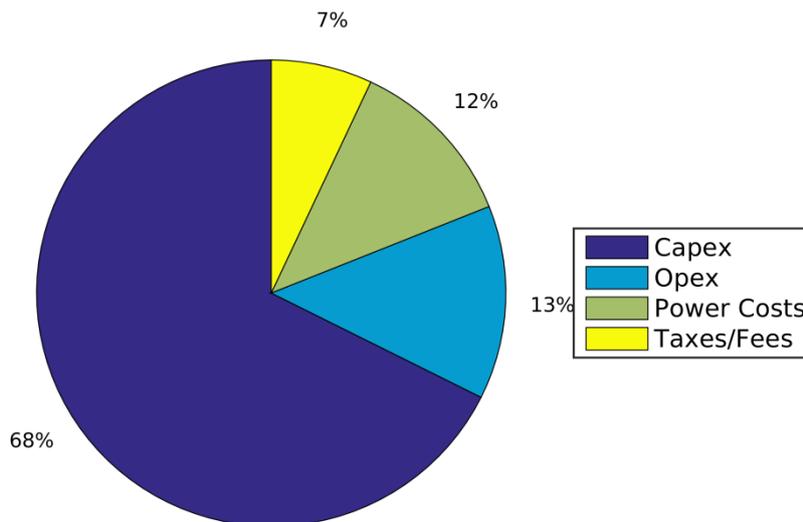


Abb. 48 Spezifische Kosten der Wasserstofftankstelle VAG nach Kostengruppen (hier am Beispiel von Konzept 2.1)

Anhand dieser Ergebnisse wird deutlich, dass die Investitionskosten einen erheblichen Anteil an den spez. Kosten einer Wasserstofftankstelle über deren gesamte Lebensdauer haben. Eine detaillierte Auslegung der einzelnen Komponenten, insbesondere Verdichter und Speicher, kann die Investitionskosten reduzieren und damit die Gesamtkosten der Tankstelle nennenswert senken.

Eine Steigerung der Energieeffizienz und damit eine Reduktion der Strombezugskosten ist ebenfalls relevant, sollte jedoch nicht zu Lasten höherer Investitionskosten erfolgen.

7.4.2.2 Wasserstofftankstelle der SBG

In diesem Projekt sind zwei Tankstellenkonzepte und –dimensionierungen erarbeitet worden, je eines für den Betriebshof der VAG und der SBG. Da der Aufbau der Tankstellen in allen Konzepten immer gleich ist und sich lediglich zwischen der VAG und SBG unterscheidet, werden nachfolgend die Ergebnisse vorgestellt, welche speziell die Tankstelle auf dem Betriebshof der SBG betreffen. Diese Ergebnisse gelten für alle Konzepte, in denen eine SBG-Tankstelle berücksichtigt wurde.

Die Ergebnisse zu der Tankstelle auf dem Betriebshof der VAG sind im vorangegangenen Kapitel 7.4.2.1 beschrieben.

Technische Ergebnisse

Verhalten der Tankstelle bei Betankungen

Das Verhalten des Hochdruckteils der Wasserstofftankstelle am Standort der SBG über ein Jahr ist in Abb. 45 dargestellt. Zusätzlich zeigt Abb. 50 im Detail den ersten Tag des Betrachtungsjahres.

In Blau ist jeweils der Speicherdruck in bar im Hochdruckspeicher, in Orange die Wasserstoffabgabemenge in kg/h an der Tankstelle dargestellt.

Analog zu der Tankstelle der VAG ist zu erkennen, dass der Druck im HD-Speicher über das gesamte Jahr zwischen ca. 370 bar und 500 bar schwankt. Insbesondere in den Sommermonaten wird die obere Druckgrenze sogar überschritten und der Druck steigt auf bis zu 520 bar. Der Grund liegt darin, dass der Speicher bis auf 500 bar gefüllt werden. Steigt nun im Laufe eines Tages die Temperatur an, erwärmt sich der Speicher und in der Folge dehnt sich das Gas im Speicher aus. Findet gleichzeitig über einen längeren Zeitraum keine Betankung statt, kann der Druck nicht abgebaut werden und steigt daher über den oberen Schwellwert an. Dies gilt insbesondere an den Vormittagen, da dort nur wenige Betankungen stattfinden (vgl. orangefarbene Kurve in Abb. 50). Grundsätzlich ist dieser Effekt jedoch weniger stark zu sehen, als bei der

VAG. Grund hierfür ist, dass bei der SBG auch im Laufe des Tages mehr Betankungen stattfinden. Darüber hinaus wird der HD-Speicher weniger gleichmäßig ausgenutzt, als bei der VAG. Nur etwa einmal pro Woche nähert sich der Speicherdruck der unteren Druckgrenze von 350 bar an, bleibt jedoch überwiegend oberhalb 400 bar. Eine Optimierung der Verteilung der Betankungen könnte hier zu einer gleichmäßigeren Auslastung führen. Diese würde eine geringere erforderliche Größe und damit sinkende Kosten für den HD-Speicher bedeuten.

 Konzepterstellung für eine
 Wasserstoffinfrastruktur im
 Großraum Freiburg (AP6)

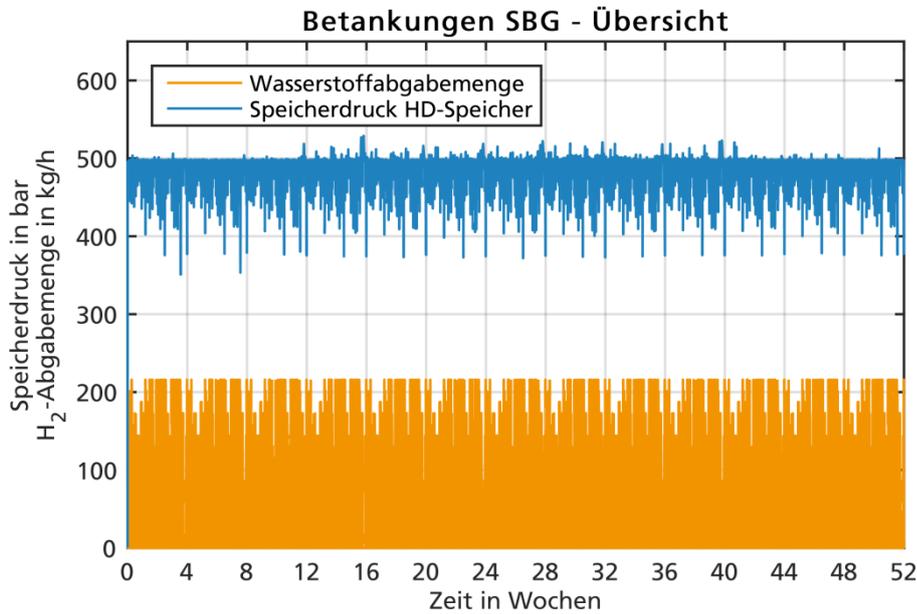


Abb. 49 Verhalten der HRS-SBG bei Betankungen (Übersicht)

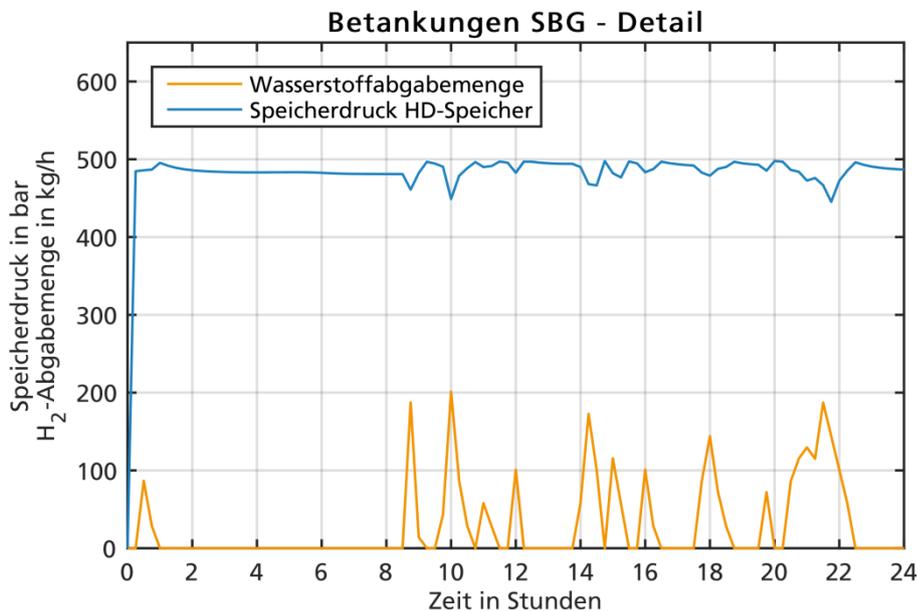


Abb. 50 Verhalten der HRS-SBG bei Betankungen (Detail)

Flächenbedarf der Wasserstoffanlagen

Der Platzbedarf der Wasserstofftankstelle und auch einer möglichen Onsite-Elektrolyse sind entscheidende Kennzahlen bei der Entscheidung einer etwaigen Umsetzung. Da das Platzangebot auf den Betriebshöfen der VAG und SBG sehr knapp ist und die vorhandene Fläche bereits heute nahezu vollständig genutzt wird, ist eine Investitionsentscheidung auch vom Flächenbedarf abhängig.

In den nachfolgenden Tabellen Tab. 22 und Tab. 23 ist die Berechnung des erforderlichen Flächenbedarfs für den Betriebshof der SBG aufgeführt.

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

| Komponente | Flächenbedarf in m ² | Zusätzlich nötige Freiflächen in m ² |
|---|---------------------------------|---|
| Elektrolyseur inkl. Leistungselektronik | 30 | 30 |
| MD-Verdichter | 30 | 30 |
| SUMME | 60 | 60 * 0,8 = 48 |

Tab. 22 Abschätzung des Flächenbedarfs der Onsite-Elektrolyseanlage der SBG

Aufgrund etwaiger Überschneidungen der Freiflächen (vgl. Kapitel 7.2) wird angenommen, dass nur 80 % der hier veranschlagten Freiflächen tatsächlich benötigt wird. Die Errichtung einer Onsite-Elektrolyseanlage am Standort der SBG erfordert somit eine freie Fläche von etwa 108 m². Es ist zu beachten, dass diese Fläche im Rahmen einer detaillierten Auslegung der Anlage zu überprüfen ist.

| Komponente | Flächenbedarf in m ² | Zusätzlich nötige Freiflächen in m ² |
|---------------------------------------|---------------------------------|---|
| Massespeicher | 2 * 2,5 | 2 * 8,8 |
| HD-Verdichter | 1 * 60 | 1 * 120 |
| HD-Speicher inkl. Regelstrecke | 1 * 15 | 1 * 34,5 |
| Dispenser (inkl. Stellfläche Omnibus) | 0 * 345 | keine |
| SUMME | 80 | 172,1 * 0,8 = 137,7 |

Tab. 23 Abschätzung des Flächenbedarfs der Tankstelle der SBG

Auch für die Freiflächen der Tankstelle wurde eine Überschneidung von 20 % angenommen, sodass tatsächlich nur 80 % der hier veranschlagten Freifläche benötigt werden. Die Errichtung einer Tankstelle am Standort der SBG erfordert somit eine Fläche von 217,7 m².

Der Flächenbedarf des Dispensers wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da es sich hierbei um den Bedarf der finalen Ausbaustufe handelt. Es wird daher angenommen, dass der Dispenser anstelle der bisherigen Zapfsäulen für Dieselmotoren errichtet wird und somit kein zusätzlicher Platzbedarf erforderlich ist. Während einer möglichen Übergangszeit, in der sowohl eine Diesel- als auch eine Wasserstofftankstelle auf dem Betriebshof installiert sind, wäre der Flächenbedarf jedoch zu berücksichtigen.

In Summe wird für die Errichtung einer Onsite-Elektrolyse sowie einer Wasserstofftankstelle zur Versorgung des maximalen Potenzials an Wasserstoffbussen der VAG eine Fläche von rund. $(60 + 48 + 80 + 137,7) \text{ m}^2 = 297,7 \text{ m}^2$ benötigt.

Ökonomische Ergebnisse

Berechnung der spezifischen Kosten der Tankstelle SBG

Nachfolgend werden die spezifischen Kosten der Tankstelle SBG beschrieben. Deren Einfluss auf die TCO des jeweiligen Konzepts findet sich in den Ergebniskapiteln des jeweiligen Konzepts und wird nicht hier beschrieben.

Die spezifischen Kosten der Tankstelle SBG je vertanktem Kilogramm Wasserstoff betragen unabhängig vom betrachteten Konzept 1,53 €/kg.

In Abb. 51 sind die spezifischen Kosten der Tankstelleninfrastruktur der SBG nach Komponenten aufgeschlüsselt. Die Abbildung gibt den prozentualen Anteil der Kosten jeder Komponente pro vertanktem Kilogramm Wasserstoff wieder. Eine Komponente beinhaltet dabei sowohl die Investitionskosten (CAPEX) als auch die Betriebs- und Wartungskosten (OPEX). Die Stromkosten sowie dafür anfallende Umlagen und Steuern sind separat aufgeführt.

Es ist zu erkennen, dass die Komponente Hochdruckverdichter (HP Compressor) mit 36 % den höchsten Anteil an den spez. Kosten der Tankstelle hat, knapp gefolgt vom Mitteldruckspeicher (H₂-Storage 200 bar). Der Hochdruckspeicher (H₂-Storage 500 bar) und der Dispenser haben mit 5 % bzw. <1 % nur geringen Einfluss.

Relevante Kosten entstehen durch den Strombezug (10 %) sowie durch die zugehörigen Steuern und Umlagen (Taxes / Fees) mit 6 %. Kosten für das Engineering der Tankstelle haben einen Anteil von 9 %.

Im Vergleich zur Tankstelle der VAG (voriger Abschnitt) fällt ein deutlich größerer Anteil des Massespeichers und ein wesentlich kleinerer Anteil des HD-Speichers auf. Der Grund hierfür ist, dass in der Dimensionierung der Tankstellen diese Komponenten deutlich größer (Massespeicher) bzw. kleiner (HD-Speicher) dimensioniert wurden, als bei der VAG-Tankstelle. Der Grund liegt darin, dass diese jeweiligen Größen ein gutes Druckverhalten ergeben und damit beide Tankstellen jeweils ganzjährig innerhalb der Druckgrenzen der Speicher betrieben werden können. Aufgrund unterschiedlichen Wasserstoffbedarfs an den Tankstellen ergeben sich dadurch unterschiedliche Größen der Speicher.

Es ist hierbei zu betonen, dass eine Optimierung der Speichergrößen in diesem Projekt aus Zeitgründen nicht vorgenommen werden konnte. Es wird empfohlen, dies vor einer möglichen Realisierung vorzunehmen.

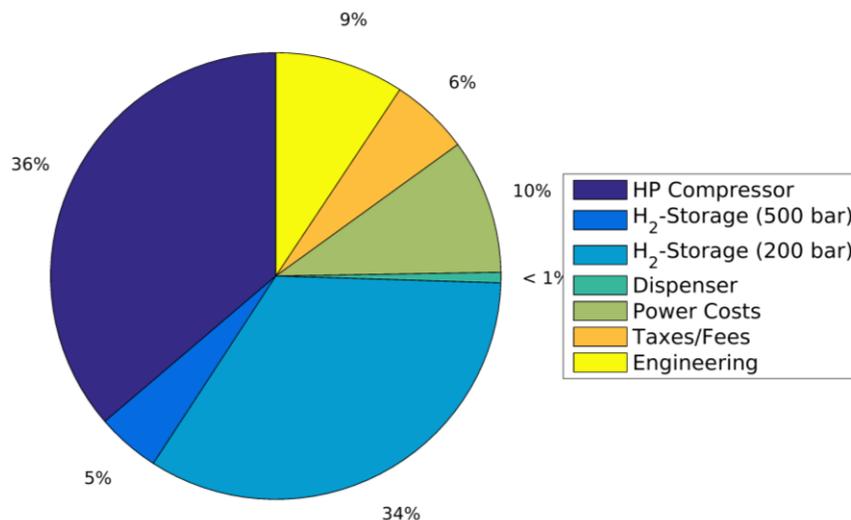
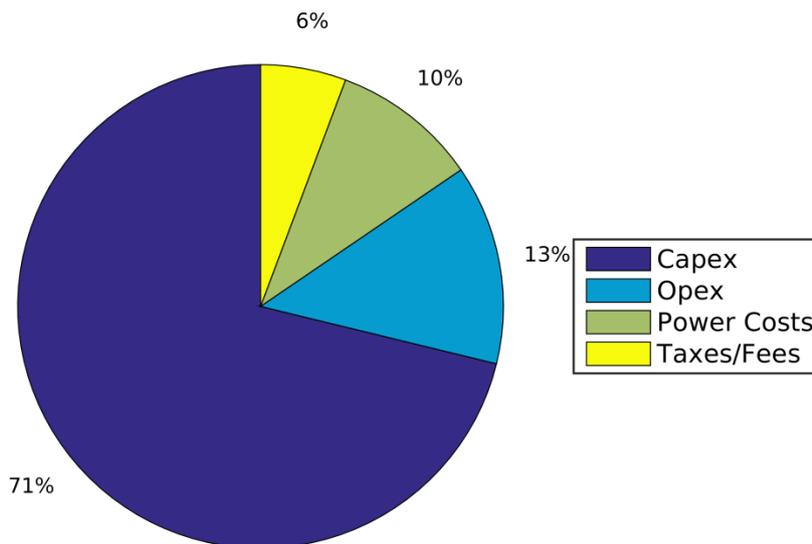


Abb. 51 Spezifische Kosten der Wasserstofftankstelle SBG nach Komponenten (hier am Beispiel von Konzept 2.2)

In einer anderen Darstellung der gleichen Ergebnisse sind in Abb. 52 die spezifischen Kosten nach Kostengruppe aufgeschlüsselt. Es ist zu erkennen, dass die Investitionskosten für die Errichtung der Tankstelle mit 71 % den bei weitem größten Anteil an den spez. Kosten haben. Die Strombezugskosten inkl. Steuern und Umlagen haben mit insgesamt 16 % den zweitgrößten Anteil, OPEX haben einen Anteil von 13 %.



Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Abb. 52 Spezifische Kosten der Wasserstofftankstelle SBG nach Kostengruppen (hier am Beispiel von Konzept 2.2)

Anhand dieser Ergebnisse wird deutlich, dass die Investitionskosten einen erheblichen Anteil an den spez. Kosten einer Wasserstofftankstelle über deren gesamte Lebensdauer haben. Eine detaillierte Auslegung der einzelnen Komponenten, insbesondere Verdichter und Speicher, kann die Investitionskosten reduzieren und damit die Gesamtkosten der Tankstelle nennenswert senken.

Eine Steigerung der Energieeffizienz und damit eine Reduktion der Strombezugskosten ist ebenfalls relevant, sollte jedoch nicht zu Lasten höherer Investitionskosten erfolgen.

Es zeigt sich, dass sich die Aufteilung nach Kostengruppen zwischen beiden Tankstellen kaum unterscheidet, wenngleich bei der SBG-Tankstelle der Massespeicher einen wesentlich größeren Anteil ausmacht, und damit die spezifischen Kosten bei dieser Tankstelle um ca. 0,22 €/kg vertanktem Wasserstoff höher liegen, als bei der Tankstelle der VAG.

Exkurs: Röhrenspeicher als Alternative zum oberirdischen Massespeicher

Untergrundröhrenspeicher können eine Option zur Reduzierung der Kosten für die Vorort-Speicherung von Wasserstoff sein. Untergrundröhrenspeicher werden bereits seit vielen Jahren als Netzpuffer im Erdgasbereich eingesetzt. Sie bestehen aus einer Reihe von Gas-Pipeline-Rohren, die unterirdisch parallel zueinander verlegt und miteinander verbunden werden. Die Auslegung, Materialwahl und der Korrosionsschutz stellen dabei eine i.d.R. einen nahezu wartungsfreien Betrieb sicher.

Diese Art der Wasserstoffspeicherung wurde auch für die Vorratsspeicher der beiden Betriebshof-Tankstellen mit den Betreibern diskutiert: Im Falle der VAG werden Erdarbeiten aufgrund des Untergrundes (vgl. Kapitel 4.1.2) vom Betreiber sehr negativ bewertet. Bei der SBG werden Untergrundröhrenspeicher prinzipiell als machbar angesehen, jedoch werden die Speicher aufgrund der Einschränkungen im Betriebsablauf und der nicht gegebenen Zugänglichkeit des Speichers nicht uneingeschränkt positiv bewertet.

Für die Abschätzung der Preise für Untergrundröhrenspeicher mit Wasserstoff wurden drei Unternehmen aus der Erdgasbranche um Richtpreisangebote für einen Erdgasröhrenspeicher gebeten. Es zeigte sich im Dialog mit den Firmen, dass aktuell noch keinerlei Erfahrung mit Wasserstoff als Medium existierte und sowohl bei der Materialwahl, als auch bei der Auslegung offene Fragen aufkamen, die zum Zeitpunkt dieses Projektes noch nicht geklärt werden konnten. Die resultierenden Preise der Unternehmen streuen stark und enthalten vermutlich hohe Sicherheitsaufschläge oder

Optimierungspotenzial. Umgerechnet auf eine Wasserstoffspeicherung bei 80 bar liegen die spezifischen Preise bei etwa 420 €/kg im Vergleich zu 650 €/kg für einen oberirdisch aufgestellten 200 bar Röhrenspeicher.

 Konzepterstellung für eine
 Wasserstoffinfrastruktur im
 Großraum Freiburg (AP6)

Für die Tankstelle der SBG würde der Röhrenspeicher damit auf Basis einer Annahme von mittleren spezifischen Kosten von 420 €/kg für den Untergrundröhrenspeicher einerseits eine Kostenreduzierung der TCO eines Wasserstoffbusses von 5 Cent/km (bei einem TCO von 4,36 €/km im Bestfall) und eine Reduzierung der Aufstellfläche von 30 m² (im Vergleich zu 297,7 m² der Gesamtanlage) bedeuten.

Damit bedeutet ein Untergrundröhrenspeicher eine nur geringe Reduzierung der Kosten und eine leichte Reduzierung der Aufstellfläche. Aufgrund der Einschränkungen im Betrieb und der Tatsache, dass für Untergrundröhrenspeicher mit Wasserstoff aktuell keine Erfahrungen der Hersteller existieren, werden Untergrundröhrenspeicher daher nicht weiter betrachtet.

Es ist jedoch wichtig zu erwähnen, dass Untergrundröhrenspeicher aufgrund der dann deutlicheren Platzersparnis relevant werden können, wenn die Anforderungen an die Vorort-Bevorratung von Kraftstoffen zwingend größere Speicher vorschreiben (aktuell wird aus Kosten- und Platzgründen nur ein 1-Tagesspeicher vorgesehen). Hierfür sind jedoch aufgrund der aktuell noch geringen Erfahrungen der Hersteller aus Sicht der Autoren Demonstrationsprojekte zur Erprobung und Optimierung notwendig.

7.4.2.3 Konzept 1.1.1 – VAG + SBG

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Konzeptbewertung beschrieben, die Grundlagen zum Konzeptaufbau und die Annahmen sind in den Kapiteln 7.1 und 7.3 nachzulesen.

Technische Ergebnisse

In Tab. 24 sind die technischen Ergebnisse der Bewertung des Konzepts 1.1.1 zusammengefasst.

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|--|-------|----------------|
| Anteil EE am Strombedarf | 45,5 | % |
| Anteil PV-Strom am Strombedarf | 12,7 | % |
| Anteil zertifizierter Grünstrom am Strombedarf | 87,7 | % |
| Anzahl Trailerfahrten EL | 883 | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten VAG | 553 | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten SBG | 330 | Stück/a |
| Footprint der Onsite-EL | - | m ² |
| Footprint HRS VAG | 250,7 | m ² |
| Footprint HRS SBG | 217,0 | m ² |

Tab. 24 Übersicht der techn. Ergebnisse für Konzept 1.1.1 - VAG + SBG

Strombezug der Elektrolyseanlage

Der Strombezug der Elektrolyseanlage erfolgt in diesem Konzept mittels eines eigenen PV-Kraftwerks sowie durch Strombezug aus dem öffentlichen Netz. Abb. 53 zeigt die Leistungsaufnahme der Elektrolyseanlage über das Betrachtungsjahr.

Es ist zu erkennen, dass die Photovoltaikanlage (grün) in den Sommermonaten einen nennenswerten Beitrag zur Leistungsversorgung der EL leisten kann. Gerade in den Wintermonaten beträgt die Leistung des PV-Kraftwerks auch in der Spitze häufig nur gut 40 % der Leistungsaufnahme der Elektrolyse. Dies führt dazu, dass im Jahresmittel nur 12,3 % des genutzten Strom aus dem PV-Kraftwerk und 87,7 % aus dem öffentlichen Netz bezogen werden.

 Konzepterstellung für eine
 Wasserstoffinfrastruktur im
 Großraum Freiburg (AP6)

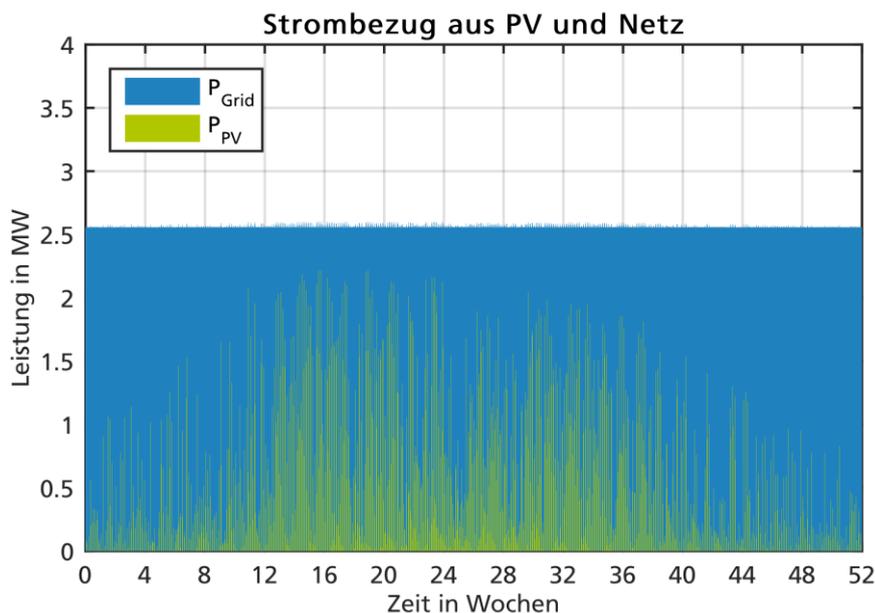


Abb. 53 Strombezug der Elektrolyseanlage in Konzept 1.1.1 - VAG + SBG

Der hier angesetzte deutsche Strommix 2018 mit einem Anteil erneuerbarer Energien von 38,9 % führt, zusammen mit dem Strombezug aus PV, der zu 100 % als erneuerbar eingerechnet wird, zu einem Anteil von 45,5 % erneuerbarer Energien am für die Elektrolyse eingesetzten Strom.

Trailerfahrten

Die Anzahl der Trailerfahrten zwischen der zentralen Elektrolyseanlage und den beiden Wasserstofftankstellen VAG und SBG wurde mit Hilfe des Simulationsmodells ermittelt. Über das gesamte Betrachtungsjahr fahren 883 Trailer vom Betriebsgelände der Erzeugungsanlage zu den Tankstellen, wovon 553 zum Betriebshof der VAG und 330 zum Betriebshof der SBG fahren. Täglich fahren somit zwischen 0,9 und 1,5 Trailern auf die Betriebshöfe.

Die hier genannten Zahlenwerte stellen einen Maximalfall dar. Durch gezielte Optimierung des Gesamtsystems, etwa mittels eines generischen Optimierungsalgorithmus, kann das Gesamtsystem und damit auch die Anzahl Trailerfahrten minimiert werden. Ein solcher Algorithmus konnte im Projekt aufgrund der knappen Zeit nicht mehr angewendet werden.

Ökonomische Ergebnisse

Die wichtigste ökonomische Kennzahl zur Bewertung der unterschiedlichen Konzepte in diesem Projekt sind die TCO, welche wiederum die LCOH_y der Wasserstoffherzeugung sowie die spezifischen Kosten der Wasserstofftankstelle enthalten.

Nachfolgend werden daher zunächst die TCO und anschließend deren Zusammensetzung aus unterschiedlichen Kostenbestandteilen dargestellt.

In Tab. 25 sind die ökonomischen Kennzahlen in einer Übersicht dargestellt. Für die Berechnung der spez. Kosten der Wasserstofftankstellen (HRS VAG und HRS SBG) siehe Kapitel 7.4.2.1 sowie 7.4.2.2.

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|---------------------------|------|---------|
| LCOHy EL | 7,37 | €/kg |
| spez. Kosten HRS VAG | 1,30 | €/kg |
| spez. Kosten. HRS SBG | 1,52 | €/kg |
| TCO VAG | 4,49 | €/km |
| TCO SBG | 4,47 | €/km |

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Tab. 25 Übersicht der ökon. Ergebnisse für Konzept 1.1.1 - VAG + SBG

TCO

Im Konzept 1.1.1 betragen die TCO für Busse der VAG 4,49 €/km und für Busse der SBG 4,47 €/km.

In den Abb. 54 und Abb. 55 ist die anteilige Zusammensetzung der jeweiligen TCO dargestellt. Es ist zu sehen, dass sowohl bei der VAG als auch der SBG etwa die Hälfte der Kosten durch Bereitstellung und Betrieb des Fahrzeugs anfallen und die andere Hälfte durch die Bereitstellung des Kraftstoffs Wasserstoff verursacht wird.

Den größten Anteil macht in beiden Fällen die Erzeugung des Wasserstoffs mittels Elektrolyse aus. Die Kosten für den Strombezug (inkl. Steuern und Umlagen) der Elektrolyse sowie die Kosten für den Transport des Wasserstoffs vom Standort der Elektrolyse zu den Tankstellen sind im Anteil „PtG-Anlage“ enthalten.

Verglichen mit den Literaturwerten (siehe Kapitel 0) liegen die TCO in diesem Konzept am oberen Ende der Bandbreite.

Es ist zudem zu bemerken, dass 70 % des TCO durch technologiespezifische Kosten beeinflusst sind, lediglich die Kosten für die Busfahrer*Innen sind nicht abhängig von der Technologie. Der positive Aspekt ist dabei, dass durch eine optimierte Auslegung von Wasserstofftankstelle und –erzeugungsanlage sowie deren Betriebsstrategie eine Reduzierung des TCO in den Händen der Planung liegt.

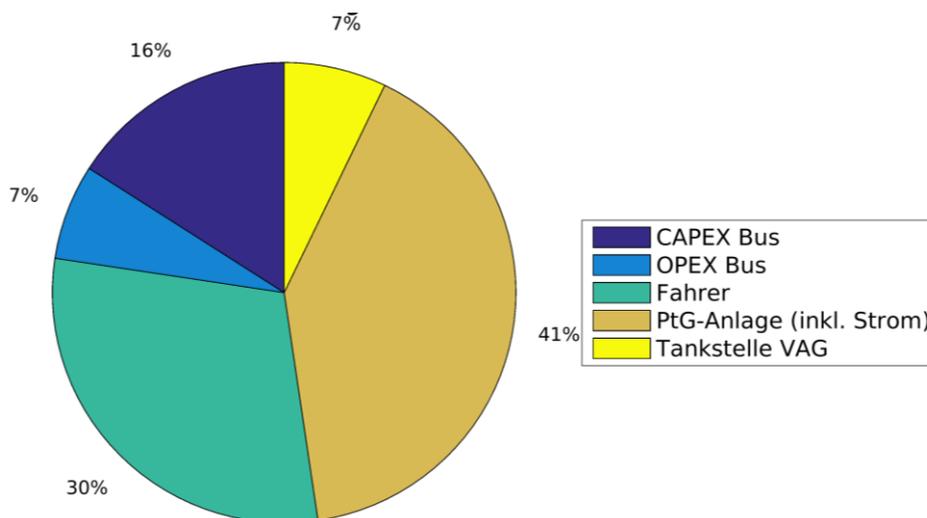


Abb. 54 TCO von Konzept 1.1.1 (VAG)

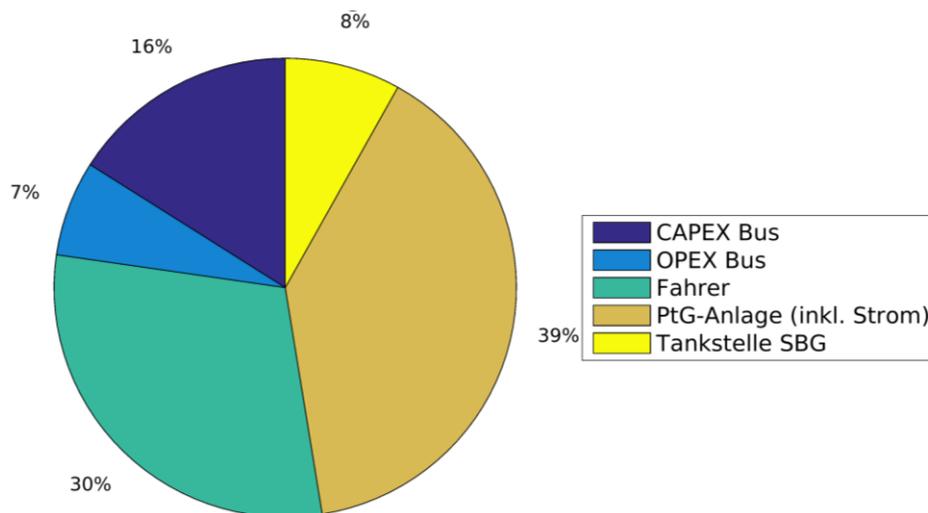


Abb. 55 TCO von Konzept 1.1.1 (SBG)

LCOHy Elektrolyse

Da die TCO zu etwa 40 % durch die Wasserstoffgestehungskosten beeinflusst werden, sind nachfolgend die Ergebnisse der LCOHy-Berechnung der Elektrolyseanlage beschrieben.

Die Wasserstoffgestehungskosten liegen für die in diesem Konzept geplante und derzeit noch nicht optimierte Elektrolyseanlage im Freiburger Umland bei 7,37 € pro erzeugtem Kilogramm Wasserstoff.

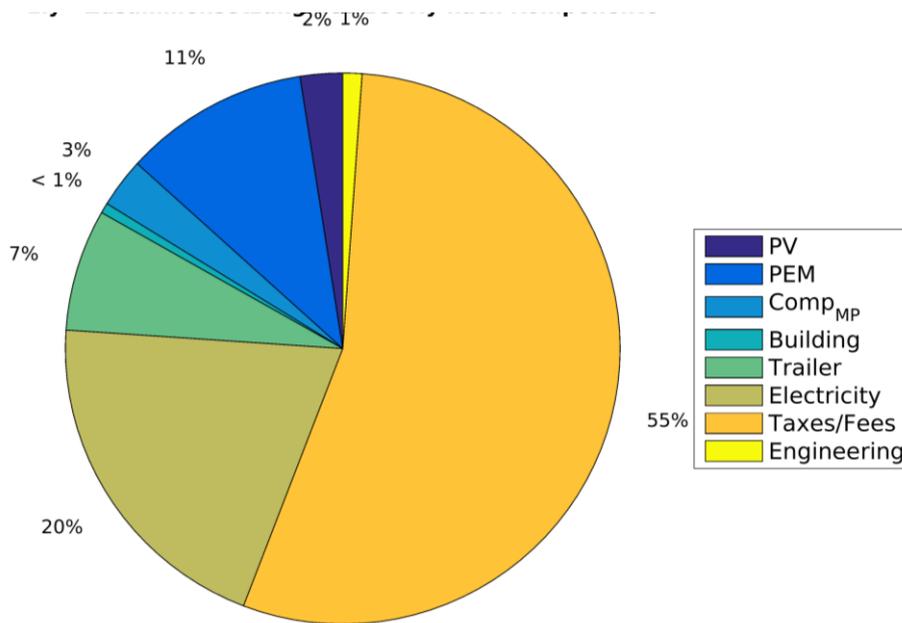
In den Abb. 56 und Abb. 57 sind diese LCOHy zum einen nach Komponenten und zum anderen nach Kostengruppen aufgeschlüsselt dargestellt.

Gut zu erkennen ist, dass die Kosten für den Strombezug aus dem öffentlichen Netz (Electricity) mit den zugehörigen Steuern / Umlagen (Taxes/Fees) 75 % der Gesamtkosten ausmachen. Die Investitions- und Betriebskosten der Elektrolyseanlage summieren sich auf einen Anteil von 15 %, der Transport des Wasserstoffs mittels Trailer hat einen Anteil von 7 %. Die Errichtung und der Betrieb der PV-Anlage haben lediglich einen Anteil von 2 % an den LCOHy.

Aus Abb. 57 wird deutlich, dass lediglich 16 % der LCOHy durch die Investitionskosten für die PtG-Anlage und das Photovoltaikkraftwerk verursacht werden. Daher liegt der Schluss nahe, dass eine weitere Kostensenkung der Technologie zwar grundsätzlich zu geringeren LCOHy beiträgt, jedoch nicht der entscheidendste Beitrag ist.

Der hohe Anteil der Strombezugskosten an den LCOHy in diesem Konzept liegt weniger an den eigentlichen Strombezugspreisen über die Strombörse als vielmehr an den fälligen Umlagen, die sich auf rund 70 €/MWh summieren, während die eigentlichen Stromkosten an der Börse in diesem Konzept (Bezugsjahr der Stromkosten ist 2016) bei lediglich 25,5 €/MWh lagen.

Des Weiteren wurde in diesem Projekt in keinem der Konzepte eine wirtschaftlich optimierte Strategie zum Betrieb der Elektrolyse entwickelt, mit deren Hilfe sich der Strombezug hinsichtlich spezieller Zielparame-ter optimieren lässt. Wird als Zielgröße etwa ein minimaler Preis gewählt, wäre eine solche Betriebsstrategie in der Lage, Stromeinkauf, Speichergrößen oder Größe des PV-Kraftwerks auf ein wirtschaftliches Optimum hin auszulegen. Die Zeit hierfür war im Projekt leider nicht vorhanden. Ein einfacher erster Schritt in diese Richtung ist eine Vergrößerung der Leistung der Photovoltaikanlage, wie sie in Konzept 1.1.2 vorgenommen wurde (siehe Kapitel 7.4.2.4).



Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Abb. 56 Ergebnisse der LCOHy-Berechnung der Elektrolyseanlage in Konzept 1.1.1 (aufgeschlüsselt nach Komponenten)

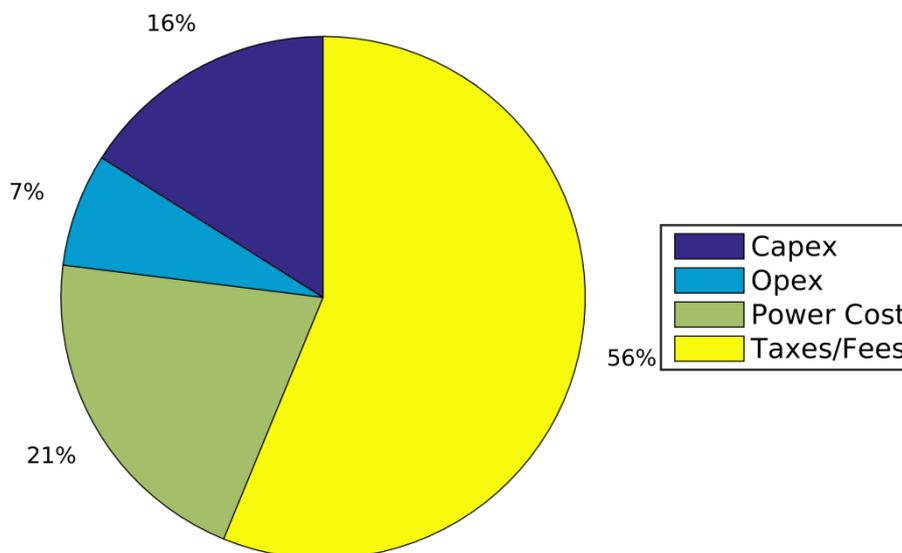


Abb. 57 Ergebnisse der LCOHy-Berechnung der Elektrolyseanlage in Konzept 1.1.1 (aufgeschlüsselt nach Kostengruppen)

7.4.2.4 Konzept 1.1.2 – VAG + SBG

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Konzeptbewertung beschrieben, die Grundlagen zum Konzeptaufbau und die Annahmen sind in den Kapiteln 7.1 und 7.3 nachzulesen

Technische Ergebnisse

In Tab. 27 sind die technischen Ergebnisse der Bewertung des Konzepts 1.1.2 zusammengefasst.

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|--|-------|----------------|
| Anteil EE am Strombedarf | 52,1 | % |
| Anteil PV-Strom am Strombedarf | 24,2 | % |
| Anteil zertifizierter Grünstrom am Strombedarf | 75,8 | % |
| Anzahl Trailerfahrten EL | 879 | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten VAG | 552 | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten SBG | 327 | Stück/a |
| Footprint der Onsite-EL | - | m ² |
| Footprint HRS VAG | 250,7 | m ² |
| Footprint HRS SBG | 217,0 | m ² |

Tab. 26 Übersicht der techn. Ergebnisse für Konzept 1.1.2 - VAG + SBG

Strombezug der Elektrolyseanlage

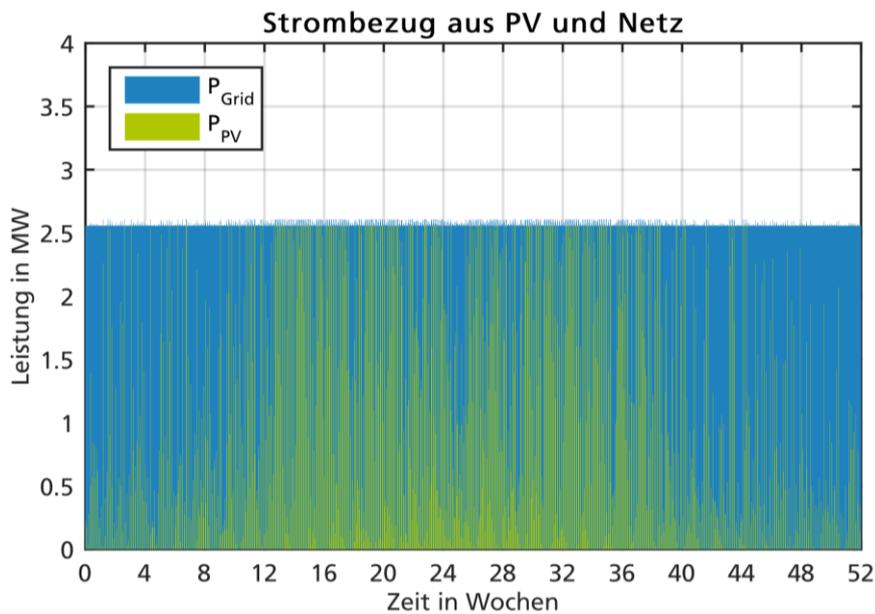
Der Strombezug der Elektrolyseanlage erfolgt in diesem Konzept mittels eines eigenen PV-Kraftwerks sowie durch Strombezug aus dem öffentlichen Netz.

Die Leistung des PV-Kraftwerks ist dabei um den Faktor 2,5 größer dimensioniert, als die Leistung der Elektrolyse und als in Konzept 1.1.1.

Abb. 53 zeigt die Leistungsaufnahme der Elektrolyseanlage über das Betrachtungsjahr. Es ist zu erkennen, dass die Photovoltaikanlage (grün) nun über das ganze Jahr einen nennenswerten Beitrag zur Leistungsversorgung der EL leisten kann. Auch hier ist jedoch eine höhere Leistung in den Sommermonaten als in den Wintermonaten zu beobachten, was durch die jahreszeitliche Schwankung der Solareinstrahlung in Deutschland verursacht wird.

Im Jahresmittel werden in diesem Konzept 24,2 % des genutzten Stroms aus dem PV-Kraftwerk und 75,8% aus dem öffentlichen Netz bezogen werden. Durch eine Überdimensionierung der Photovoltaikanlage konnte der Anteil des direkt genutzten Stroms im Vergleich zum Konzept 1.1.1 verdoppelt werden.

Durch die Überdimensionierung erzeugt die PV-Anlage bei hoher Sonneneinstrahlung Strommengen, welche nicht durch die EL genutzt werden können. Aufgrund der derzeitigen rechtlichen Rahmenbedingungen ist deren Einspeisung in das öffentliche Stromnetz nur zu hohen Kosten möglich und wird daher hier nicht betrachtet.



Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Abb. 58 Strombezug der Elektrolyseanlage in Konzept 1.1.2 - VAG + SBG

Der hier angesetzte deutsche Strommix 2018 mit einem Anteil erneuerbarer Energien von 38,9 % führt, zusammen mit dem Strombezug aus PV, der zu 100 % als erneuerbar eingerechnet wird, zu einem Anteil von 52,1 % erneuerbarer Energien am für die Elektrolyse eingesetzten Strom. Der Anteil erneuerbarer Energien erhöht sich damit um 6,6 %-Pkte. im Vergleich zu Konzept 1.1.1.

Trailerfahrten

Die Anzahl der Trailerfahrten zwischen der zentralen Elektrolyseanlage und den beiden Wasserstofftankstellen VAG und SBG wurde mit Hilfe des Simulationsmodell ermittelt. Über das gesamte Betrachtungsjahr fahren 879 Trailer vom Betriebsgelände der Erzeugungsanlage zu den Tankstellen, wovon 552 zum Betriebshof der VAG und 327 zum Betriebshof der SBG fahren. Täglich fahren somit zwischen 0,9 und 1,5 Trailern auf die Betriebshöfe.

Die hier genannten Zahlenwerte stellen einen Maximalfall dar. Durch gezielte Optimierung des Gesamtsystems, etwa mittels eines generischen Optimierungsalgorithmus, kann das Gesamtsystem und damit auch die Anzahl Trailerfahrten minimiert werden. Ein solcher Algorithmus konnte im Projekt aufgrund der knappen Zeit nicht mehr angewendet werden.

Ökonomische Ergebnisse

Die wichtigste ökonomische Kennzahl zur Bewertung der unterschiedlichen Konzepte in diesem Projekt sind die TCO, welche wiederum die LCO_{H₂} der Wasserstoffherzeugung sowie die spezifischen Kosten der Wasserstofftankstelle enthalten.

Nachfolgend werden daher zunächst die TCO und anschließend deren Zusammensetzung aus unterschiedlichen Kostenbestandteilen dargestellt.

In Tab. 28 sind die ökonomischen Kennzahlen in einer Übersicht dargestellt. Für die Berechnung der spez. Kosten der Wasserstofftankstellen (HRS VAG und HRS SBG) siehe Kapitel 7.4.2.1 sowie 7.4.2.2.

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|---------------------------|------|---------|
| LCOHy EL | 6,93 | €/kg |
| spez. Kosten HRS VAG | 1,30 | €/kg |
| spez. Kosten. HRS SBG | 1,52 | €/kg |
| TCO VAG | 4,38 | €/km |
| TCO SBG | 4,36 | €/km |

Tab. 27 Übersicht der ökon. Ergebnisse für Konzept 1.1.2 - VAG + SBG

TCO

Im Konzept 1.1.2 betragen die TCO für Busse der VAG 4,38 €/km und für Busse der SBG 4,36 €/km. Damit liegen die TCO für dieses Konzept rund 0,11 €/km unterhalb der TCO in Konzept 1.1.1.

Nur minimale Unterschiede zu Konzept 1.1.1 sind in den in Abb. 59 und Abb. 60 dargestellten anteiligen Zusammensetzungen der jeweiligen TCO zu erkennen. Es ist zu sehen, dass sowohl bei der VAG als auch der SBG etwa die Hälfte der Kosten durch Bereitstellung und Betrieb des Fahrzeugs anfallen und die andere Hälfte durch die Bereitstellung des Kraftstoffs Wasserstoff verursacht wird.

Den größten Anteil macht in beiden Fällen die Erzeugung des Wasserstoffs mittels Elektrolyse aus. Die Kosten für den Strombezug (inkl. Steuern und Umlagen) der Elektrolyse sowie die Kosten für den Transport des Wasserstoffs vom Standort der Elektrolyse zu den Tankstellen sind im Anteil „PtG-Anlage“ enthalten.

Verglichen mit den Literaturwerten (siehe Kapitel 0) liegen die TCO in diesem Konzept am oberen Ende der Bandbreite.

Es ist zudem zu bemerken, dass 70 % des TCO durch technologiespezifische Kosten beeinflusst sind, lediglich die Kosten für die Busfahrer*Innen sind nicht abhängig von der Technologie. Der positive Aspekt ist dabei, dass durch eine optimierte Auslegung von Wasserstofftankstelle und –erzeugungsanlage sowie deren Betriebsstrategie eine Reduzierung des TCO in den Händen der Planung liegt.

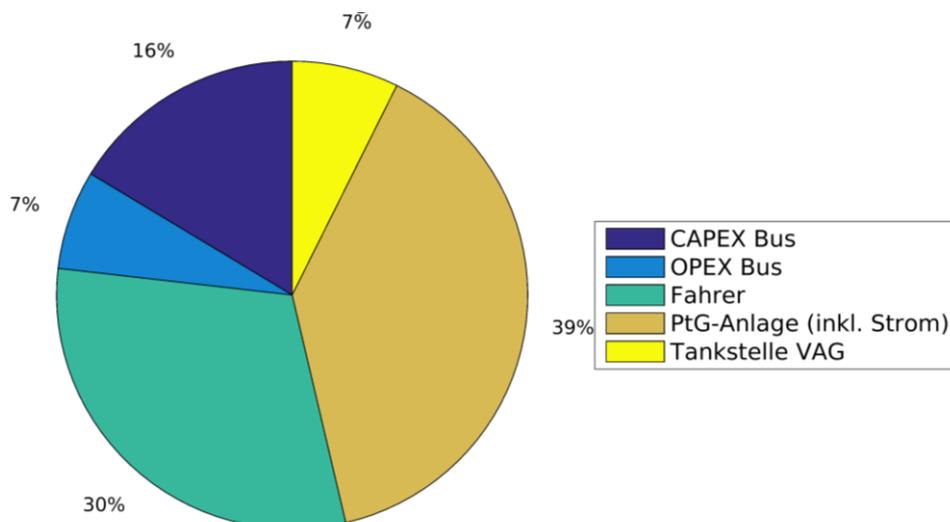
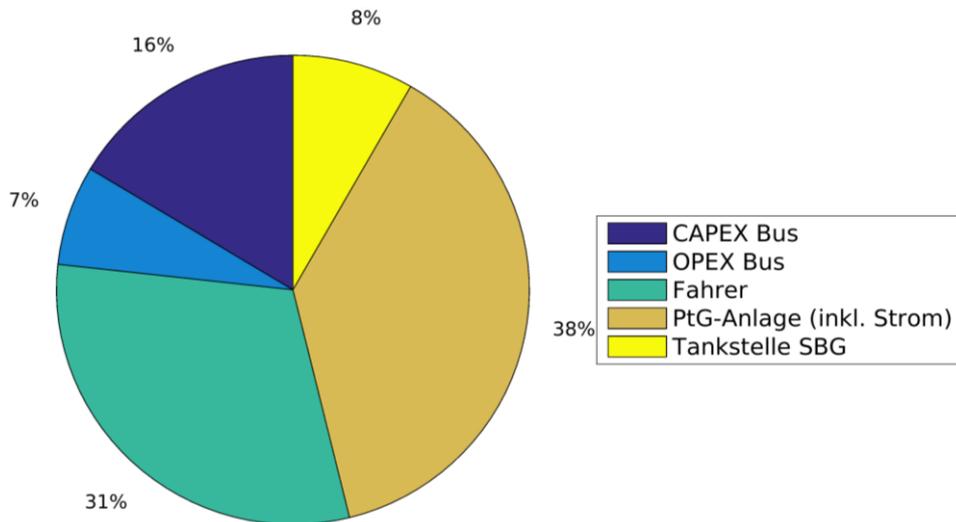


Abb. 59 TCO von Konzept 1.1.2 (VAG)



Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Abb. 60 TCO von Konzept 1.1.2 (SBG)

LCOHy Elektrolyse

Da die TCO zu etwa 40 % durch die Wasserstoffgestehungskosten beeinflusst werden, sind nachfolgend die Ergebnisse der LCOHy-Berechnung der Elektrolyseanlage beschrieben.

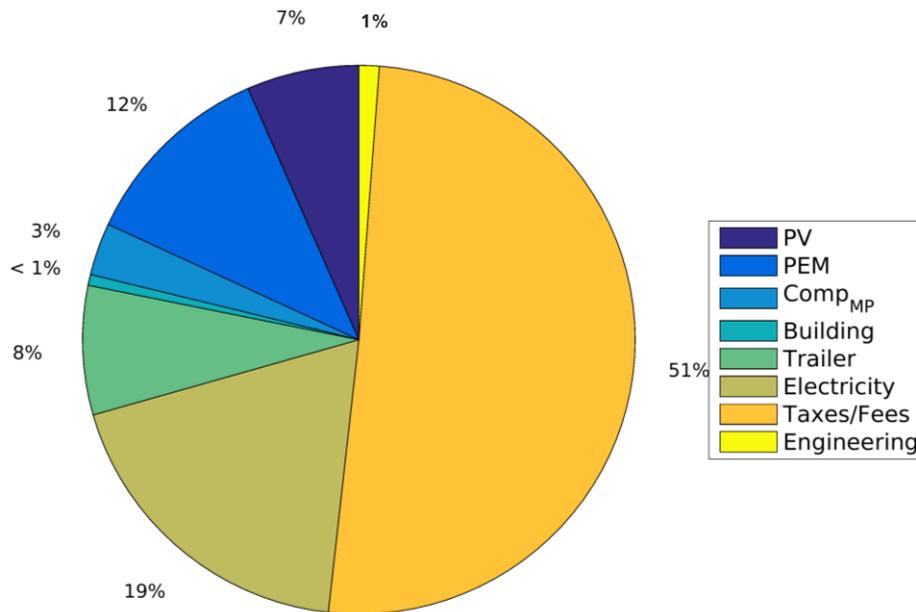
Die Wasserstoffgestehungskosten liegen für die in diesem Konzept geplante und derzeit noch nicht optimierte Elektrolyseanlage im Freiburger Umland bei 6,93 € pro erzeugtem Kilogramm Wasserstoff.

In den Abb. 61 und Abb. 62 sind diese LCOHy zum einen nach Komponenten und zum anderen nach Kostengruppen aufgeschlüsselt dargestellt.

Gut ist zu erkennen, dass die Kosten für den Strombezug aus dem öffentlichen Netz (Electricity) mit den zugehörigen Steuern / Umlagen (Taxes/Fees) 70 % der Gesamtkosten ausmachen und damit 5 %-Pkte. weniger als bei Konzept 1.1.1. Die Investitions- und Betriebskosten der Elektrolyseanlage summieren sich auf einen Anteil von 16 %, der Transport des Wasserstoffs mittels Trailer hat einen Anteil von 8 %. Im Vergleich zu Konzept 1.1.1 ist der Anteil für die Errichtung und den Betrieb der PV-Anlage von 2 % (Konzept 1.1.1) auf 7 % gestiegen, was durch die um den Faktor 2,5 größere PV-Anlage begründet ist.

Es wird deutlich, dass eine Vergrößerung der Photovoltaikanlage und damit eine Erhöhung der genutzten PV-Strommenge positive Auswirkungen auf die Wasserstoffgestehungskosten hat. Zusätzlich zum Effekt sinkender Wasserstoffkosten ergibt sich der Vorteil einer geringeren Abhängigkeit von schwankenden Börsenstrompreisen. Bei einem Anteil der Strombezugskosten von 70 % an den Wasserstoffkosten ist dieser Einfluss noch immer groß, konnte jedoch gegenüber Konzept 1.1.1 verringert werden.

Eine weitere Reduzierung der Stromkosten kann durch eine optimierte Auslegung des Strombezugs realisiert werden, wobei auch eine umfassende Betriebsstrategie der Anlage berücksichtigt werden sollte.



Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Abb. 61 Ergebnisse der LCOHy-Berechnung der Elektrolyseanlage in Konzept 1.1.2 (aufgeschlüsselt nach Komponenten)

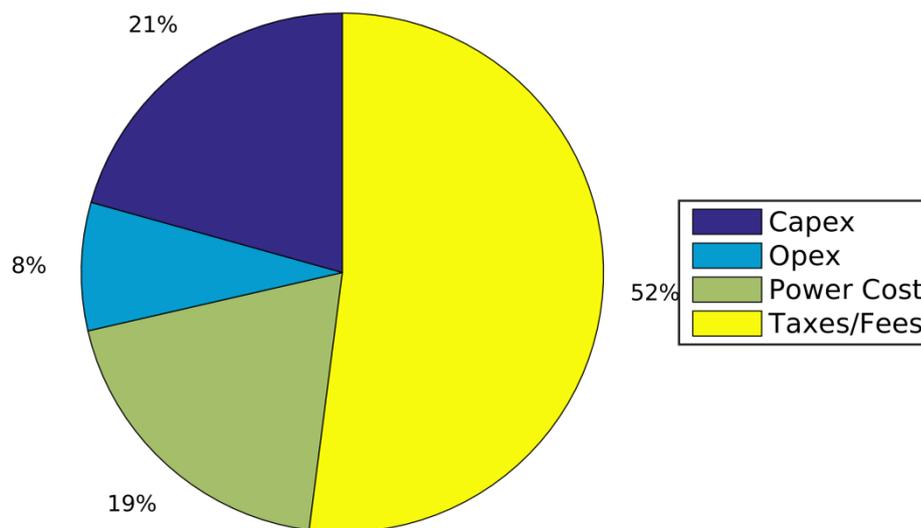


Abb. 62 Ergebnisse der LCOHy-Berechnung der Elektrolyseanlage in Konzept 1.1.2 (aufgeschlüsselt nach Kostengruppen)

7.4.2.5 Konzept 2.1 – VAG

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Konzeptbewertung beschrieben, die Grundlagen zum Konzeptaufbau und die Annahmen sind in den Kapiteln 7.1 und 7.3 nachzulesen.

Technische Ergebnisse

In Tab. 28 sind die technischen Ergebnisse der Simulation in einer Übersicht dargestellt. Die Berechnung des Footprints von Onsite-EL und Wasserstofftankstellen wurde bereits in Kapitel 7.4.2.1 beschrieben und ist deshalb hier nicht aufgeführt.

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|--|-------|----------------|
| Anteil EE am Strombedarf | 38,9 | % |
| Anteil PV-Strom am Strombedarf | 0 | % |
| Anteil zertifizierter Grünstrom am Strombedarf | 100 | % |
| Anzahl Trailerfahrten EL | 0 | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten VAG | 0 | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten SBG | - | Stück/a |
| Footprint der Onsite-EL | 108 | m ² |
| Footprint HRS VAG | 250,7 | m ² |
| Footprint HRS SBG | - | m ² |

Tab. 28 Übersicht der techn. Ergebnisse für Konzept 2.1 - VAG

Strombezug der Anlage

Der Strombezug erfolgt ausschließlich über das öffentliche Netz. Die Elektrolyseanlage wird mit einer konstanten Leistung von 1,328 MW_{el} betrieben. Der Anteil erneuerbarer Energien beträgt somit exakt den Jahresmittelwert an erneuerbarer Energie. Für das Betrachtungsjahr 2018 sind dies 38,9 %.

Die Nutzung einer Photovoltaikanlage zur Eigenstromerzeugung wird in diesem Konzept nicht betrachtet.

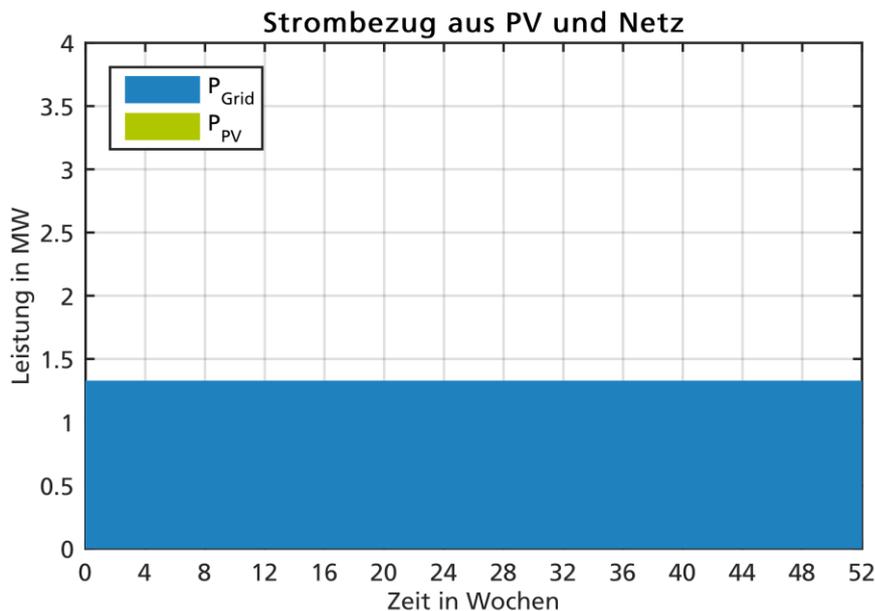


Abb. 63 Strombezug der Elektrolyseanlage in Konzept 2.1 - VAG

Trailerfahrten

Da die Wasserstoffherzeugung in diesem Konzept durch eine Onsite-Elektrolyse auf dem Betriebshof der VAG erfolgt, finden keine planmäßigen Trailerfahrten statt.

Um auch bei theoretisch denkbarem Ausfall der Elektrolyseanlage den Busbetrieb aufrecht halten zu können, sollte auch bei einer Onsite-Versorgung mit Wasserstoff die Möglichkeit einer Anlieferung mittels Trailer vorgesehen und entsprechende Zufahrtmöglichkeiten vorgehalten werden.

Ökonomische Ergebnisse

Die wichtigste ökonomische Kennzahl zur Bewertung der unterschiedlichen Konzepte in diesem Projekt sind die TCO, welche wiederum die LCOHy der Wasserstoffherzeugung sowie die spezifischen Kosten der Wasserstofftankstelle enthalten.

Nachfolgend werden daher zunächst die TCO und anschließend deren Zusammensetzung aus unterschiedlichen Kostenbestandteilen dargestellt.

In Tab. 29 sind die ökonomischen Kennzahlen in einer Übersicht dargestellt. Für die Berechnung der spez. Kosten der Wasserstofftankstellen (HRS VAG und HRS SBG) siehe Kapitel 7.4.2.1 sowie 7.4.2.2.

 Konzepterstellung für eine
 Wasserstoffinfrastruktur im
 Großraum Freiburg (AP6)

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|---------------------------|------|---------|
| LCOHy EL | 7,54 | €/kg |
| spez. Kosten HRS VAG | 1,31 | €/kg |
| spez. Kosten. HRS SBG | - | €/kg |
| TCO VAG | 4,53 | €/km |
| TCO SBG | - | €/km |

Tab. 29 Übersicht der ökon. Ergebnisse für Konzept 2.1 - VAG

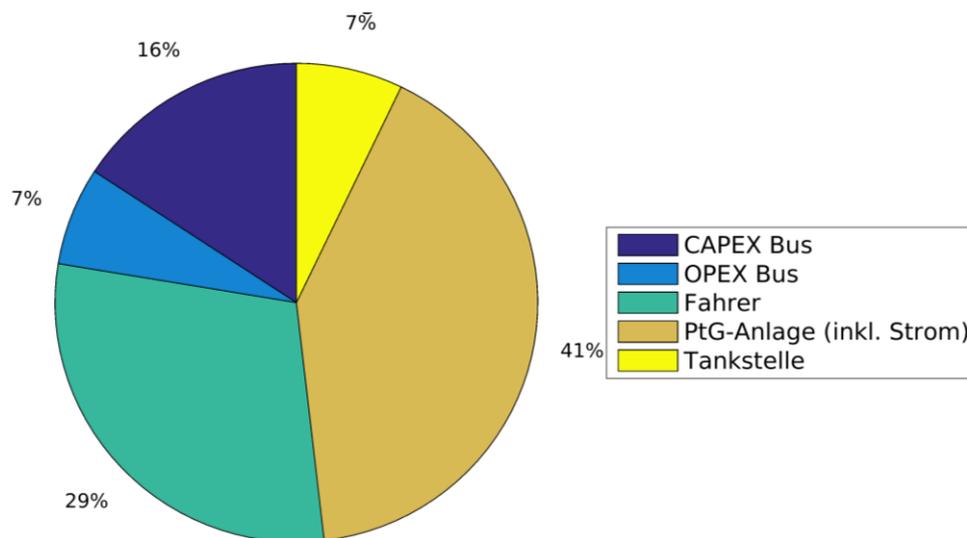
TCO

Im Konzept 2.1 betragen die TCO für Busse der VAG 4,53 €/km. Die kilometerspezifischen Kosten liegen damit ca. 0,04 €/km höher als in Konzept 1.1.1.

Die in Abb. 64 dargestellte Zusammensetzung der TCO unterscheidet sich nur minimal von den Konzepten mit Offsite-Erzeugung von Wasserstoff. Es ist zu sehen, dass erneut etwa die Hälfte der Kosten durch Bereitstellung und Betrieb des Fahrzeugs anfallen und die andere Hälfte durch die Bereitstellung des Kraftstoffs Wasserstoff verursacht wird. Den größten Anteil macht in beiden Fällen die Erzeugung des Wasserstoffs mittels Elektrolyse aus. Die Kosten für den Strombezug (inkl. Steuern und Umlagen) der Elektrolyse sind im Anteil „PtG-Anlage“ enthalten.

Verglichen mit den Literaturwerten (siehe Kapitel 0) liegen die TCO in diesem Konzept am oberen Ende der Bandbreite.

Es ist zudem zu bemerken, dass 70 % des TCO durch technologiespezifische Kosten beeinflusst sind, lediglich die Kosten für die Busfahrer*Innen sind nicht abhängig von der Technologie. Der positive Aspekt ist dabei, dass durch eine optimierte Auslegung von Wasserstofftankstelle und -erzeugungsanlage sowie deren Betriebsstrategie eine Reduzierung des TCO in den Händen der Planung liegt.



Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Abb. 64 TCO von Konzept 2.1 (VAG)

LCOHy EL

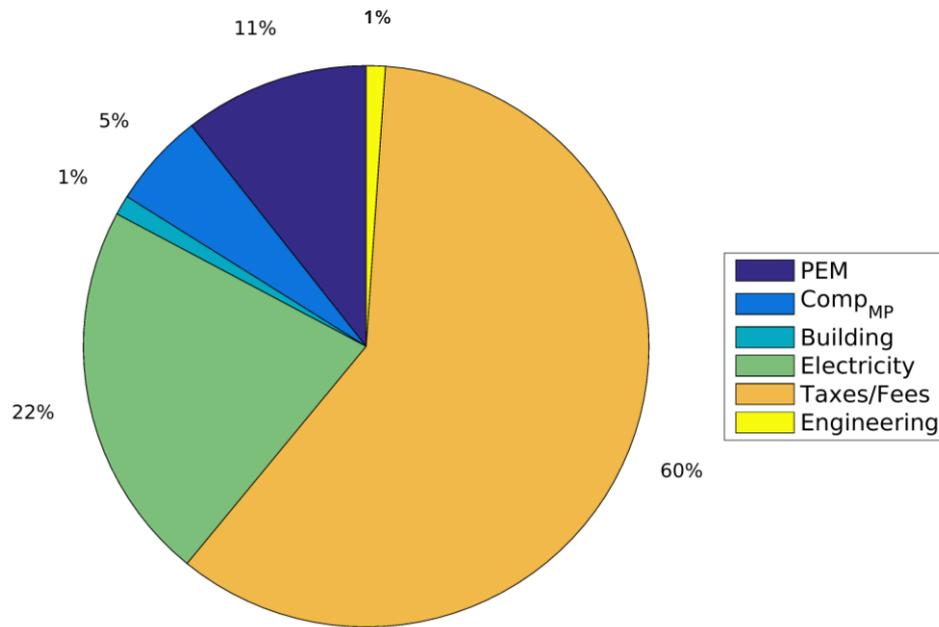
Da die TCO zu 41 % durch die Wasserstoffgestehungskosten beeinflusst werden, sind nachfolgend die Ergebnisse der LCOHy-Berechnung der Elektrolyseanlage beschrieben.

Die Wasserstoffgestehungskosten liegen für die in diesem Konzept geplante und derzeit noch nicht optimierte Elektrolyseanlage im Freiburger Umland bei 7,54 € pro erzeugtem Kilogramm Wasserstoff.

In den und Abb. 65 und Abb. 66 sind diese LCOHy zum einen nach Komponenten und zum anderen nach Kostengruppen aufgeschlüsselt dargestellt.

Gut zu erkennen ist, dass die Kosten für den Strombezug aus dem öffentlichen Netz (Electricity) mit den zugehörigen Steuern / Umlagen (Taxes/Fees) 82 % der Gesamtkosten ausmachen und damit etwa 10 %-Pkte. mehr als bei den Konzepten mit Offsite-H₂-Erzeugung (Konzept 1.1.1 und 1.1.2). Die Investitions- und Betriebskosten der Elektrolyseanlage summieren sich auf einen Anteil von 17 %. Da die Stromversorgung ausschließlich über das öffentliche Netz erfolgt, fallen keine Kosten für eine Photovoltaikanlage an. Auch der Anteil der Trailerkosten entfällt aufgrund der Onsite-Erzeugung komplett. Eine mögliche Notbelieferung mit Wasserstoff bei ungeplantem Ausfall der Elektrolyse ist nicht berücksichtigt.

Die Onsite-Versorgung der Tankstelle mit Wasserstoff führt zu einer Erhöhung der Wasserstoffgestehungskosten um 0,17 €/kg und damit der TCO um 0,04 €/km verglichen mit dem Offsite-Konzept 1.1.1 und um 0,61 €/kg bzw. 0,12 €/km verglichen mit Konzept 1.1.2. Zusätzlich steigt der Anteil der Strombezugskosten an den LCOHy. Möglicherweise steigende Strombezugskosten oder politische Entscheidungen hinsichtlich Steuern / Umlagen bedeuten somit ein vergleichsweise größeres Risiko, als bei teilweise Nutzung von selbst erzeugtem PV-Strom.



Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Abb. 65 Ergebnisse der LCOHy-Berechnung der Elektrolyseanlage in Konzept 2.1 (aufgeschlüsselt nach Komponente)

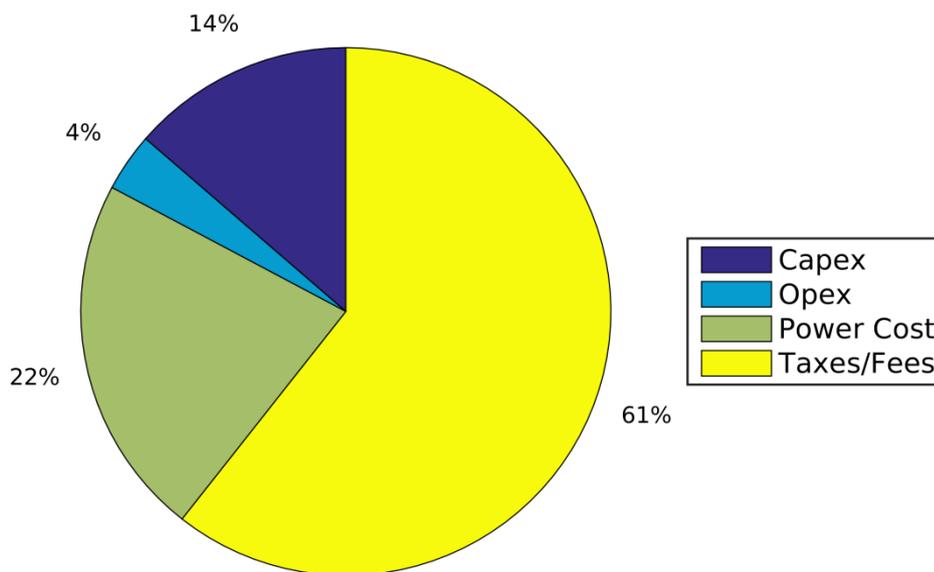


Abb. 66 Ergebnisse der LCOHy-Berechnung der Elektrolyseanlage in Konzept 2.1 (aufgeschlüsselt nach Kostengruppe)

7.4.2.6 Konzept 2.2 – SBG

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Konzeptbewertung beschrieben, die Grundlagen zum Konzeptaufbau und die Annahmen sind in den Kapiteln 7.1 und 7.3 nachzulesen.

Technische Ergebnisse

In Tab. 30 sind die technischen Ergebnisse der Simulation in einer Übersicht dargestellt. Die Berechnung des Footprints von Onsite-EL und Wasserstofftankstellen wurde bereits in Kapitel 7.4.2.1 beschrieben und ist deshalb hier nicht aufgeführt.

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|--|------|----------------|
| Anteil EE am Strombedarf | 38,9 | % |
| Anteil PV-Strom am Strombedarf | 0 | % |
| Anteil zertifizierter Grünstrom am Strombedarf | 100 | % |
| Anzahl Trailerfahrten EL | 0 | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten VAG | - | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten SBG | 0 | Stück/a |
| Footprint der Onsite-EL | 108 | m ² |
| Footprint HRS VAG | - | m ² |
| Footprint HRS SBG | 217 | m ² |

Tab. 30 Übersicht der techn. Ergebnisse für Konzept 2.2 - SBG

Strombezug der Anlage

Der Strombezug erfolgt ausschließlich über das öffentliche Netz. Die Elektrolyseanlage wird mit einer konstanten Leistung von 1,229 MW_{el} betrieben. Damit liegt die Leistung um etwa 8 % unterhalb derer der Onsite-Tankstelle VAG (Konzept 2.1), was auf den geringeren Wasserstoffbedarf der SBG zurückzuführen ist.

Der Anteil erneuerbarer Energien beträgt somit exakt den Jahresmittelwert an erneuerbarer Energie. Für das Betrachtungsjahr 2018 sind dies 38,9 %.

Die Nutzung einer Photovoltaikanlage zur Eigenstromerzeugung wird in diesem Konzept nicht betrachtet.

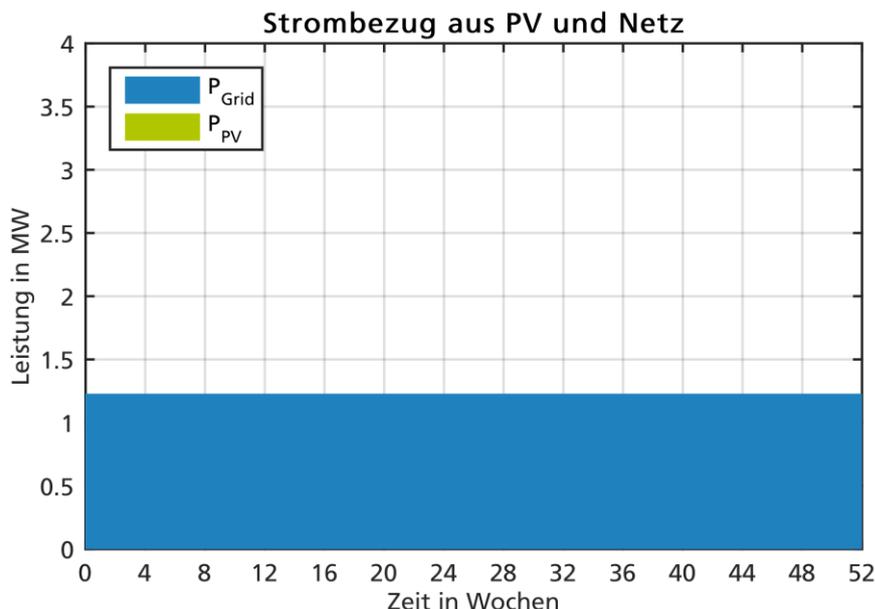


Abb. 67 Strombezug der Elektrolyseanlage in Konzept 2.2 - SBG

Trailerfahrten

Da die Wasserstoffherzeugung in diesem Konzept durch eine Onsite-Elektrolyse auf dem Betriebshof der VAG erfolgt, finden keine planmäßigen Trailerfahrten statt.

Um auch bei theoretisch denkbarem Ausfall der Elektrolyseanlage den Busbetrieb aufrecht halten zu können, sollte auch bei einer Onsite-Versorgung mit Wasserstoff die Möglichkeit einer Anlieferung mittels Trailer vorgesehen und entsprechende Zufahrtmöglichkeiten vorgehalten werden.

 Konzepterstellung für eine
 Wasserstoffinfrastruktur im
 Großraum Freiburg (AP6)

Ökonomische Ergebnisse

Die wichtigste ökonomische Kennzahl zur Bewertung der unterschiedlichen Konzepte in diesem Projekt sind die TCO, welche wiederum die LCOHy der Wasserstoffherzeugung sowie die spezifischen Kosten der Wasserstofftankstelle enthalten.

Nachfolgend werden daher zunächst die TCO und anschließend deren Zusammensetzung aus unterschiedlichen Kostenbestandteilen dargestellt.

In Tab. 29 sind die ökonomischen Kennzahlen in einer Übersicht dargestellt. Für die Berechnung der spez. Kosten der Wasserstofftankstellen (HRS VAG und HRS SBG) siehe Kapitel 7.4.2.1 sowie 7.4.2.2.

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|---------------------------|------|---------|
| LCOHy EL | 7,49 | €/kg |
| spez. Kosten HRS VAG | - | €/kg |
| spez. Kosten. HRS SBG | 1,53 | €/kg |
| TCO VAG | - | €/km |
| TCO SBG | 4,50 | €/km |

Tab. 31 Übersicht der ökon. Ergebnisse für Konzept 2.2 - SBG

TCO

Im Konzept 2.2 betragen die TCO für Busse der VAG 4,50 €/km. Die kilometerspezifischen Kosten liegen damit ca. 0,03 €/km höher als in Konzept 1.1.1.

Die in Abb. 68 dargestellte Zusammensetzung der TCO unterscheidet sich nur minimal von den Konzepten mit Offsite-Erzeugung von Wasserstoff und von Konzept 2.1. Es ist zu sehen, dass erneut etwa die Hälfte der Kosten durch Bereitstellung und Betrieb des Fahrzeugs anfallen und die andere Hälfte durch die Bereitstellung des Kraftstoffs Wasserstoff verursacht wird.

Den größten Anteil macht in beiden Fällen die Erzeugung des Wasserstoffs mittels Elektrolyse aus. Die Kosten für den Strombezug (inkl. Steuern und Umlagen) der Elektrolyse sind im Anteil „PtG-Anlage“ enthalten.

Verglichen mit den Literaturwerten (siehe Kapitel 0) liegen die TCO in diesem Konzept am oberen Ende der Bandbreite.

Es ist zudem zu bemerken, dass 70 % des TCO durch technologiespezifische Kosten beeinflusst sind, lediglich die Kosten für die Busfahrer*Innen sind nicht abhängig von der Technologie. Der positive Aspekt ist dabei, dass durch eine optimierte Auslegung von Wasserstofftankstelle und –erzeugungsanlage sowie deren Betriebsstrategie eine Reduzierung des TCO in den Händen der Planung liegt.

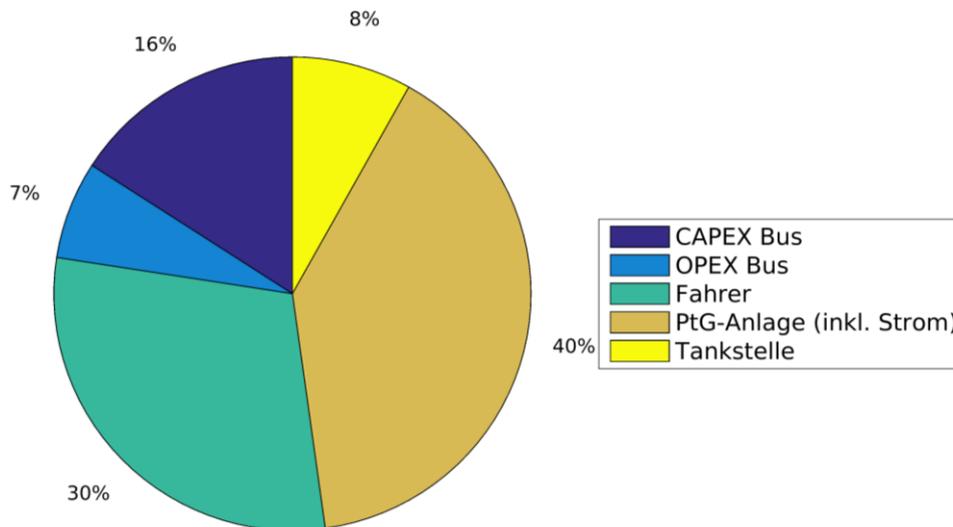


Abb. 68 TCO von Konzept 2.2 (SBG)

LCOHy EL

Da die TCO zu 41 % durch die Wasserstoffgestehungskosten beeinflusst werden, sind nachfolgend die Ergebnisse der LCOHy-Berechnung der Elektrolyseanlage beschrieben.

Die Wasserstoffgestehungskosten liegen für die in diesem Konzept geplante und derzeit noch nicht optimierte Elektrolyseanlage im Freiburger Umland bei 7,54 € pro erzeugtem Kilogramm Wasserstoff.

In den Abb. 69 und Abb. 70 sind diese LCOHy zum einen nach Komponenten und zum anderen nach Kostengruppen aufgeschlüsselt dargestellt.

Gut zu erkennen ist, dass die Kosten für den Strombezug aus dem öffentlichen Netz (Electricity) mit den zugehörigen Steuern / Umlagen (Taxes/Fees) 81 % der Gesamtkosten ausmachen und damit etwa 10 %-Pkte. mehr als bei den Konzepten mit Offsite-H₂-Erzeugung (Konzept 1.1.1 und 1.1.2). Die Investitions- und Betriebskosten der Elektrolyseanlage summieren sich auf einen Anteil von 18 %. Da die Stromversorgung ausschließlich über das öffentliche Netz erfolgt, fallen keine Kosten für eine Photovoltaikanlage an. Auch der Anteil der Trailerkosten entfällt aufgrund der Onsite-Erzeugung komplett. Mögliche Notbelieferung mit Wasserstoff bei ungeplantem Ausfall der Elektrolyse ist nicht berücksichtigt.

Die Onsite-Versorgung der Tankstelle mit Wasserstoff führt zu einer Erhöhung der Wasserstoffgestehungskosten um 0,12 €/kg und damit der TCO um 0,03 €/km verglichen mit dem Offsite-Konzept 1.1.1 und sogar um 0,56 €/kg bzw. 0,14 €/km verglichen mit Konzept 1.1.2. Zusätzlich steigt der Anteil der Strombezugskosten an den LCOHy. Möglicherweise steigende Strombezugskosten oder politische Entscheidungen hinsichtlich Steuern / Umlagen bedeuten somit ein vergleichsweise größeres Risiko, als bei teilweise Nutzung von selbst erzeugtem PV-Strom.

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

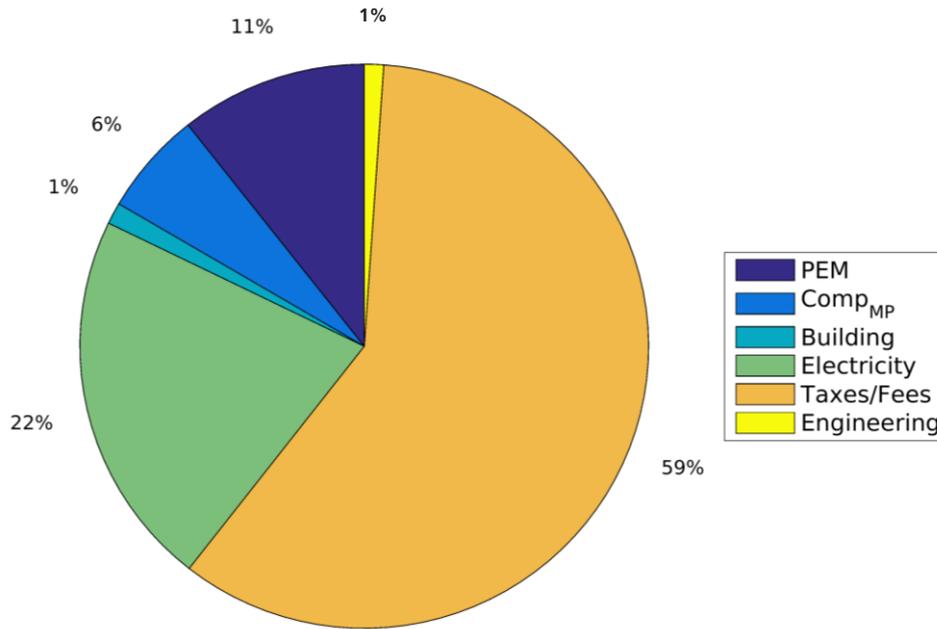


Abb. 69 Ergebnisse der LCOHy-Berechnung der Elektrolyseanlage in Konzept 2.2 (aufgeschlüsselt nach Komponente)

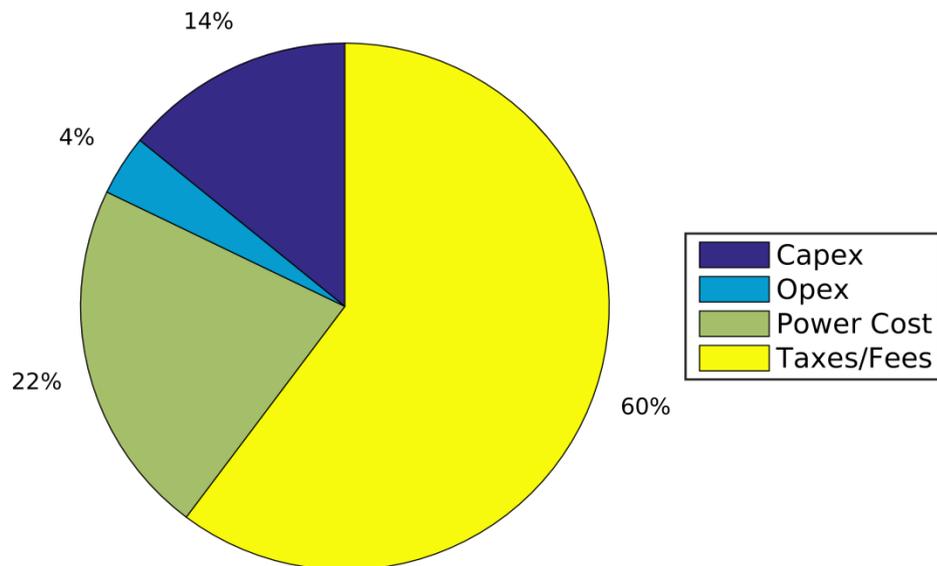


Abb. 70 Ergebnisse der LCOHy-Berechnung der Elektrolyseanlage in Konzept 2.2 (aufgeschlüsselt nach Kostengruppe)

7.4.2.7 Konzept 3.1 – VAG

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Konzeptbewertung beschrieben, die Grundlagen zum Konzeptaufbau und die Annahmen sind in den Kapiteln 7.1 und 7.3 nachzulesen.

Technische Ergebnisse

In Tab. 28 sind die technischen Ergebnisse der Simulation in einer Übersicht dargestellt. Die Berechnung des Footprints von Onsite-EL und Wasserstofftankstellen wurde bereits in Kapitel 7.4.2.1 beschrieben und ist deshalb hier nicht aufgeführt.

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|--|-------|----------------|
| Anteil EE am Strombedarf | 0 | % |
| Anteil PV-Strom am Strombedarf | 0 | % |
| Anteil zertifizierter Grünstrom am Strombedarf | 0 | % |
| Anzahl Trailerfahrten EL | 0 | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten VAG | 363 | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten SBG | - | Stück/a |
| Footprint der Onsite-EL | 0 | m ² |
| Footprint HRS VAG | 250,7 | m ² |
| Footprint HRS SBG | - | m ² |

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Tab. 32 Übersicht der techn. Ergebnisse für Konzept 3.1 - VAG

Strombezug der Anlage

Da in diesem Szenario die Wasserstoffproduktion extern durch einen Dritten erfolgt, wird keine Elektrolyseanlage berücksichtigt.

Trailerfahrten

Die Anzahl der Trailerfahrten ergibt sich aus dem jährlichen Wasserstoffbedarf der Tankstelle. Dieser liegt bei der VAG bei rund 207 t/a. Ein Trailer kann bei einem Druck von 500 bar rund 1.100 kg Wasserstoff fassen, was bei einem Zieldruck im Massespeicher von 200 bar einer nutzbaren Trailerkapazität von 570 kg entspricht. Unter der Annahme, dass die Trailerlieferung immer genau dann eintrifft, wenn der Massespeicher seine untere Druckgrenze von 200 bar erreicht, ergibt sich daraus eine rechnerisch eine Anzahl von 363 Trailerfahrten pro Jahr. Dies ist als Mindestwert zu verstehen, da eine solch ideale Terminierung des Ankunftszeitpunkts, wie sie hier angenommen ist, in der Realität nicht möglich sein wird. In der Realität wird sich die Anzahl der Trailerfahrten zwischen dem hier berechneten Mindestwert und dem in Konzept 2.1 mit Hilfe der Simulation berechneten Wert von 553 Fahrten pro Jahr bewegen.

Ökonomische Ergebnisse

Die wichtigste ökonomische Kennzahl zur Bewertung der unterschiedlichen Konzepte in diesem Projekt sind die TCO, welche wiederum die LCOH_y der Wasserstoffherzeugung sowie die spezifischen Kosten der Wasserstofftankstelle enthalten.

Nachfolgend werden daher zunächst die TCO und anschließend deren Zusammensetzung aus unterschiedlichen Kostenbestandteilen dargestellt.

In Tab. 33 sind die ökonomischen Kennzahlen in einer Übersicht dargestellt. Für die Berechnung der spez. Kosten der Wasserstofftankstellen (HRS VAG und HRS SBG) siehe Kapitel 7.4.2.1 sowie 7.4.2.2.

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|---------------------------|------|---------|
| LCOHy EL | - | €/kg |
| spez. Kosten HRS VAG | 1,31 | €/kg |
| spez. Kosten. HRS SBG | - | €/kg |
| TCO VAG | 5,78 | €/km |
| TCO SBG | - | €/km |

Tab. 33 Übersicht der ökon. Ergebnisse für Konzept 3.1 - VAG

TCO

Im Konzept 3.1 betragen die TCO für Busse der VAG 5,78 €/km. Die kilometerspezifischen Kosten liegen damit 1,25 €/km höher als im Konzept 2.1 (Onsite-Erzeugung von Wasserstoff) und um bis zu 1,40 €/km höher als bei Offsite-Erzeugung von Wasserstoff (Konzept 1.1.2).

Die in Abb. 71 dargestellte Zusammensetzung der TCO unterscheidet sich deutlich von den bisherigen Konzepten. Es zu erkennen, dass für die Bereitstellung des Kraftstoffs ca. 60 % der Kosten anfallen, wovon der eigentliche Einkauf grünen Wasserstoffs den Großteil ausmacht (54 % der Gesamtkosten).

Verglichen mit den Literaturwerten (siehe Kapitel 0) liegen die TCO in diesem Konzept deutlich oberhalb der ausgewerteten Projekte. Die Versorgung von Wasserstofftankstellen durch externen Zukauf von grünem Wasserstoff aus weit entfernte Quellen (hier 430 km) ist offensichtlich kein tragfähiges Geschäftsmodell, da die Kosten für die Erzeugung und den Transport signifikant höher sind, als bei eigener Erzeugung.

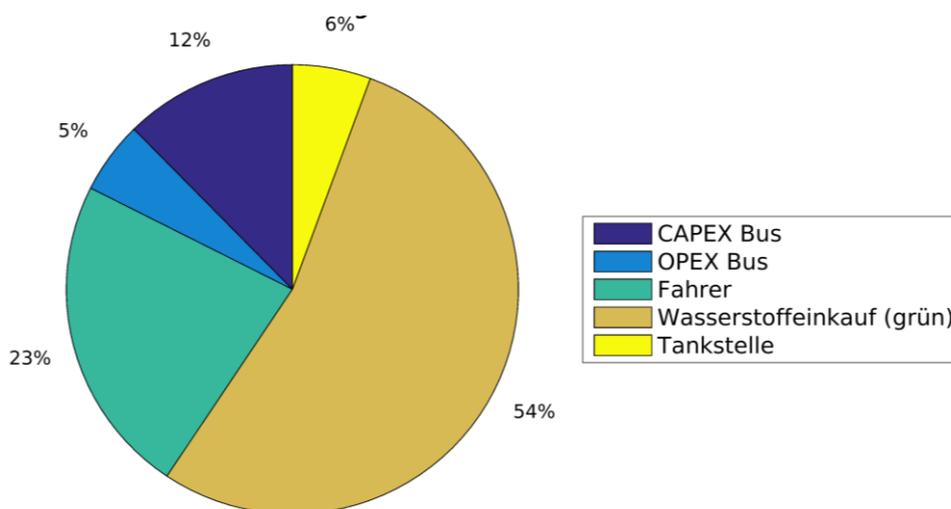


Abb. 71 TCO von Konzept 3.1 (VAG)

LCOHy EL

Da in diesem Konzept die Wasserstoffversorgung durch externe Anlieferung erfolgt, entfällt dieser Abschnitt.

7.4.2.8 Konzept 3.2 – SBG

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Konzeptbewertung beschrieben, die Grundlagen zum Konzeptaufbau und die Annahmen sind in den Kapiteln 7.1 und 7.3 nachzulesen.

Technische Ergebnisse

In Tab. 34 sind die technischen Ergebnisse der Simulation in einer Übersicht dargestellt. Die Berechnung des Footprints von Onsite-EL und Wasserstofftankstellen wurde bereits in 7.4.2.2 beschrieben und ist deshalb hier nicht aufgeführt.

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|--|------|----------------|
| Anteil EE am Strombedarf | 0 | % |
| Anteil PV-Strom am Strombedarf | 0 | % |
| Anteil zertifizierter Grünstrom am Strombedarf | 0 | % |
| Anzahl Trailerfahrten EL | 0 | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten VAG | - | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten SBG | 350 | Stück/a |
| Footprint der Onsite-EL | - | m ² |
| Footprint HRS VAG | - | m ² |
| Footprint HRS SBG | 217 | m ² |

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Tab. 34 Übersicht der techn. Ergebnisse für Konzept 3.2 - SBG

Strombezug der Anlage

Da in diesem Szenario die Wasserstoffproduktion extern durch einen Dritten erfolgt, wird keine Elektrolyseanlage berücksichtigt.

Trailerfahrten

Die Anzahl der Trailerfahrten ergibt sich aus dem jährlichen Wasserstoffbedarf der Tankstelle. Dieser liegt bei der SBG bei rund 200 t/a. Ein Trailer kann bei einem Druck von 500 bar rund 1.100 kg Wasserstoff fassen, was bei einem Zieldruck im Massespeicher von 200 bar einer nutzbaren Trailerkapazität von 570 kg entspricht. Unter der Annahme, dass die Trailerlieferung immer genau dann eintrifft, wenn der Massespeicher seine untere Druckgrenze von 200 bar erreicht, ergibt sich daraus eine rechnerisch eine Anzahl von 350 Trailerfahrten pro Jahr.

Ökonomische Ergebnisse

Die wichtigste ökonomische Kennzahl zur Bewertung der unterschiedlichen Konzepte in diesem Projekt sind die TCO, welche wiederum die LCOH der Wasserstoffherzeugung sowie die spezifischen Kosten der Wasserstofftankstelle enthalten.

Nachfolgend werden daher zunächst die TCO und anschließend deren Zusammensetzung aus unterschiedlichen Kostenbestandteilen dargestellt.

In Tab. 35 Tab. 33 sind die ökonomischen Kennzahlen in einer Übersicht dargestellt. Für die Berechnung der spez. Kosten der Wasserstofftankstellen (HRS VAG und HRS SBG) siehe Kapitel 7.4.2.1 sowie 7.4.2.2.

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|---------------------------|------|---------|
| LCOHy EL | - | €/kg |
| spez. Kosten HRS VAG | - | €/kg |
| spez. Kosten. HRS SBG | 1,53 | €/kg |
| TCO VAG | - | €/km |
| TCO SBG | 5,71 | €/km |

Tab. 35 Übersicht der ökon. Ergebnisse für Konzept 3.2 - SBG

TCO

Im Konzept 3.2 betragen die TCO für Busse der SBG 5,71 €/km. Die kilometerspezifischen Kosten liegen damit 1,21 €/km höher als im Konzept 2.2 (Onsite-Erzeugung von Wasserstoff) und um bis zu 1,35 €/km höher als bei Offsite-Erzeugung von Wasserstoff (Konzept 1.1.2).

Die in Abb. 71 dargestellte Zusammensetzung der TCO unterscheidet sich deutlich von den bisherigen Konzepten. Es zu erkennen, dass für die Bereitstellung des Kraftstoffs ca. 59 % der Kosten anfallen, wovon der eigentliche Einkauf grünen Wasserstoffs den Großteil ausmacht (53 % der Gesamtkosten).

Verglichen mit den Literaturwerten (siehe Kapitel 0) liegen die TCO in diesem Konzept deutlich oberhalb der ausgewerteten Projekte. Die Versorgung von Wasserstofftankstellen durch externen Zukauf von grünem Wasserstoff aus weit entfernte Quellen (hier 430 km) ist offensichtlich kein tragfähiges Geschäftsmodell, da die Kosten für die Erzeugung und den Transport signifikant höher sind, als bei eigener Erzeugung.

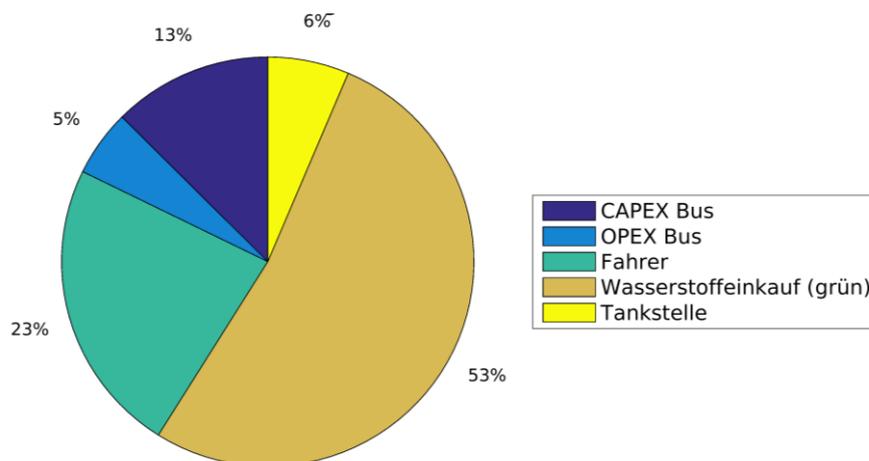


Abb. 72 TCO von Konzept 3.2 (SBG)

LCOHy EL

Da in diesem Konzept die Wasserstoffversorgung durch externe Anlieferung erfolgt, entfällt dieser Abschnitt.

7.4.2.9 Konzept 4.1 – VAG

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Konzeptbewertung beschrieben, die Grundlagen zum Konzeptaufbau und die Annahmen sind in den Kapiteln 7.1 und 7.3 nachzulesen.

Technische Ergebnisse

In Tab. 36 Tab. 28 sind die technischen Ergebnisse der Simulation in einer Übersicht dargestellt. Die Berechnung des Footprints von Onsite-EL und Wasserstofftankstellen wurde bereits in Kapitel 7.4.2.1 beschrieben und ist deshalb hier nicht aufgeführt.

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|--|-------|----------------|
| Anteil EE am Strombedarf | 0 | % |
| Anteil PV-Strom am Strombedarf | 0 | % |
| Anteil zertifizierter Grünstrom am Strombedarf | 0 | % |
| Anzahl Trailerfahrten EL | 0 | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten VAG | 363 | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten SBG | - | Stück/a |
| Footprint der Onsite-EL | 0 | m ² |
| Footprint HRS VAG | 250,7 | m ² |
| Footprint HRS SBG | - | m ² |

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Tab. 36 Übersicht der techn. Ergebnisse für Konzept 4.1 - VAG

Strombezug der Anlage

Da in diesem Szenario die Wasserstoffproduktion extern durch einen Dritten erfolgt, wird keine Elektrolyseanlage berücksichtigt.

Trailerfahrten

Die Anzahl der Trailerfahrten ergibt sich analog zur Berechnung in Kapitel 7.4.2.7 und beträgt in diesem Konzept 363 Fahrten pro Jahr.

Ökonomische Ergebnisse

Die wichtigste ökonomische Kennzahl zur Bewertung der unterschiedlichen Konzepte in diesem Projekt sind die TCO, welche wiederum die LCOH_y der Wasserstofferzeugung sowie die spezifischen Kosten der Wasserstofftankstelle enthalten.

Nachfolgend werden daher zunächst die TCO und anschließend deren Zusammensetzung aus unterschiedlichen Kostenbestandteilen dargestellt.

In Tab. 37 Tab. 33 sind die ökonomischen Kennzahlen in einer Übersicht dargestellt. Für die Berechnung der spez. Kosten der Wasserstofftankstellen (HRS VAG und HRS SBG) siehe Kapitel 7.4.2.1 sowie 7.4.2.2.

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|---------------------------|------|---------|
| LCOHy EL | - | €/kg |
| spez. Kosten HRS VAG | 1,31 | €/kg |
| spez. Kosten. HRS SBG | - | €/kg |
| TCO VAG | 4,40 | €/km |
| TCO SBG | - | €/km |

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Tab. 37 Übersicht der ökon. Ergebnisse für Konzept 4.1 - VAG

TCO

Im Konzept 4.1 betragen die TCO für Busse der VAG 4,40 €/km. Die kilometerspezifischen Kosten liegen damit 0,13 €/km niedriger als im Konzept 2.1 (Onsite-Erzeugung von Wasserstoff) und zwischen 0,02 €/km oberhalb (Konzept 1.1.2) bzw. 0,09 €/km unterhalb der Kosten bei Offsite-Erzeugung von Wasserstoff.

Die in Abb. 73 Abb. 71 dargestellte Zusammensetzung der TCO unterscheidet sich deutlich von dem Konzept 3.1. Es zu erkennen, dass für die Bereitstellung des Kraftstoffs ca. 46 % der Kosten anfallen, wovon der eigentliche Einkauf grauen Wasserstoffs den Großteil ausmacht (39 % der Gesamtkosten).

Verglichen mit den Literaturwerten (siehe Kapitel 0) liegen die TCO in diesem Konzept bei Einkauf von konventionell erzeugtem Wasserstoff wieder innerhalb der Grenzen der ausgewerteten Projekte.

Die Versorgung von Wasserstofftankstellen durch externen Zukauf von grauem Wasserstoff aus weit entfernte Quellen (hier 430 km) ermöglicht aus wirtschaftlicher Sicht somit ein tragfähiges Geschäftsmodell. Dieses wird derzeit unter anderem von der H2Mobility umgesetzt, die auf diese Weise die existierenden 75 PKW-Tankstellen in Deutschland versorgt.

Seitens der Literatur herrscht jedoch Einigkeit darüber, dass die zur Wasserstofferzeugung verwendete Energie unbedingt aus erneuerbaren Quellen stammen muss. Andernfalls ist den Klimaschutzbemühungen, um die es bei der Anschaffung von Wasserstoffbussen unter anderem geht, kein Nutzen erbracht.

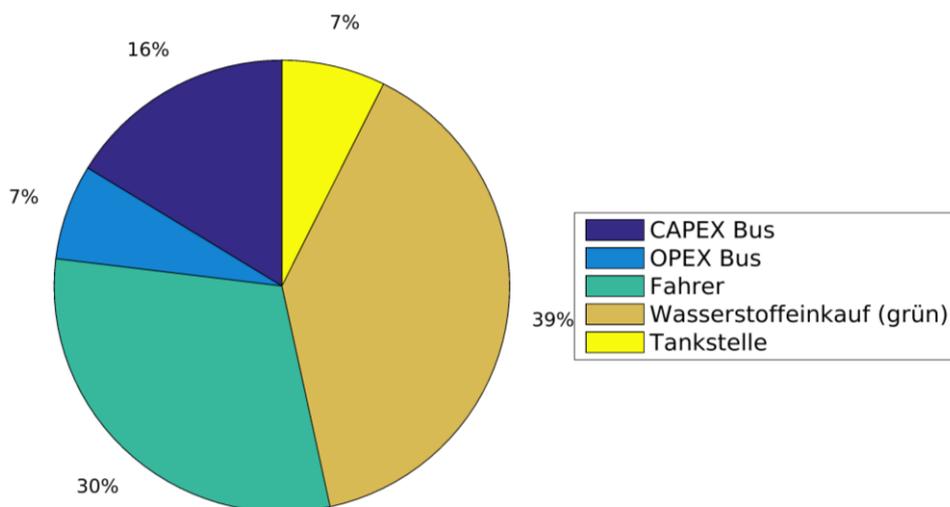


Abb. 73 TCO von Konzept 4.1 (VAG)

LCOHy EL

Da in diesem Konzept die Wasserstoffversorgung durch externe Anlieferung erfolgt, entfällt dieser Abschnitt.

Konzepterstellung für eine
Wasserstoffinfrastruktur im
Großraum Freiburg (AP6)

7.4.2.10 Konzept 4.2 – SBG

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Konzeptbewertung beschrieben, die Grundlagen zum Konzeptaufbau und die Annahmen sind in den Kapiteln 7.1 und 7.3 nachzulesen.

Technische Ergebnisse

In Tab. 38 sind die technischen Ergebnisse der Simulation in einer Übersicht dargestellt. Die Berechnung des Footprints von Onsite-EL und Wasserstofftankstellen wurde bereits in 7.4.2.2 beschrieben und ist deshalb hier nicht aufgeführt.

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|--|------|----------------|
| Anteil EE am Strombedarf | 0 | % |
| Anteil PV-Strom am Strombedarf | 0 | % |
| Anteil zertifizierter Grünstrom am Strombedarf | 0 | % |
| Anzahl Trailerfahrten EL | 0 | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten VAG | - | Stück/a |
| Anzahl Trailerfahrten SBG | 350 | Stück/a |
| Footprint der Onsite-EL | - | m ² |
| Footprint HRS VAG | - | m ² |
| Footprint HRS SBG | 217 | m ² |

Tab. 38 Übersicht der techn. Ergebnisse für Konzept 4.2 - SBG

Strombezug der Anlage

Da in diesem Szenario die Wasserstoffproduktion extern durch einen Dritten erfolgt, wird keine Elektrolyseanlage berücksichtigt.

Trailerfahrten

Die Anzahl der Trailerfahrten ergibt sich aus dem jährlichen Wasserstoffbedarf der Tankstelle. Dieser liegt bei der SBG bei rund 200 t/a. Ein Trailer kann bei einem Druck von 500 bar rund 1.100 kg Wasserstoff fassen, was bei einem Zieldruck im Massespeicher von 200 bar einer nutzbaren Trailerkapazität von 570 kg entspricht. Unter der Annahme, dass die Trailerlieferung immer genau dann eintrifft, wenn der Massespeicher seine untere Druckgrenze von 200 bar erreicht, ergibt sich daraus eine rechnerisch eine Anzahl von 350 Trailerfahrten pro Jahr.

Ökonomische Ergebnisse

Die wichtigste ökonomische Kennzahl zur Bewertung der unterschiedlichen Konzepte in diesem Projekt sind die TCO, welche wiederum die LCOHy der Wasserstoffherzeugung sowie die spezifischen Kosten der Wasserstofftankstelle enthalten.

Nachfolgend werden daher zunächst die TCO und anschließend deren Zusammensetzung aus unterschiedlichen Kostenbestandteilen dargestellt.

In Tab. 35 sind die ökonomischen Kennzahlen in einer Übersicht dargestellt. Für die Berechnung der spez. Kosten der Wasserstofftankstellen (HRS VAG und HRS SBG) siehe Kapitel 7.4.2.1 sowie 7.4.2.2.

Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

| Key Performance Indicator | Wert | Einheit |
|---------------------------|------|---------|
| LCOHy EL | - | €/kg |
| spez. Kosten HRS VAG | - | €/kg |
| spez. Kosten. HRS SBG | 1,53 | €/kg |
| TCO VAG | - | €/km |
| TCO SBG | 5,71 | €/km |

Tab. 39 Übersicht der ökon. Ergebnisse für Konzept 4.2 - SBG

TCO

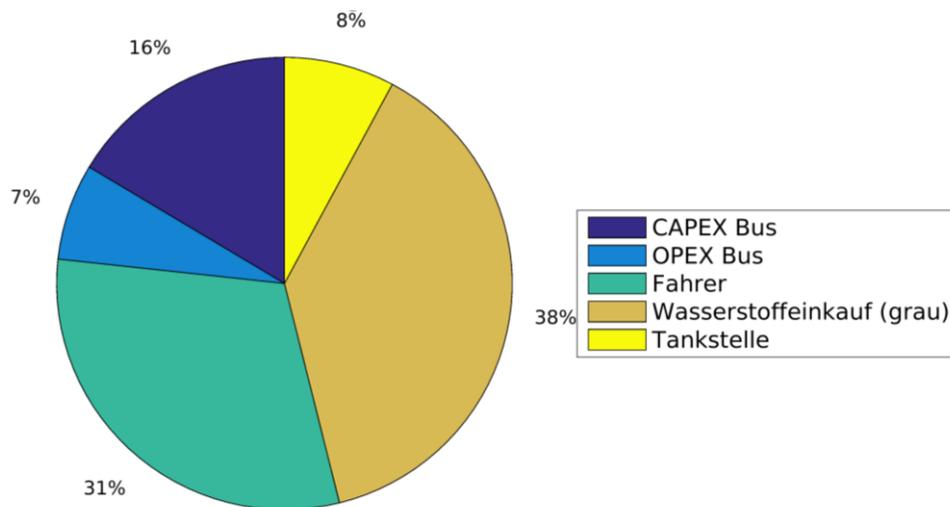
Im Konzept 3.2 betragen die TCO für Busse der SBG 4,38 €/km. Die kilometerspezifischen Kosten liegen um 0,12 €/km unterhalb der Kosten in Konzept 2.2 (Onsite-Erzeugung von Wasserstoff) und gleichauf mit der Offsite-Erzeugung von Wasserstoff (Konzept 1.1.2).

Die in Abb. 74/Abb. 71 dargestellte Zusammensetzung der TCO unterscheidet sich deutlich von dem Konzept 3.1. Es zu erkennen, dass für die Bereitstellung des Kraftstoffs ca. 46 % der Kosten anfallen, wovon der eigentliche Einkauf grauen Wasserstoffs den Großteil ausmacht (38 % der Gesamtkosten).

Verglichen mit den Literaturwerten (siehe Kapitel 0) liegen die TCO in diesem Konzept bei Einkauf von konventionell erzeugtem Wasserstoff wieder innerhalb der Grenzen der ausgewerteten Projekte.

Die Versorgung von Wasserstofftankstellen durch externen Zukauf von grauem Wasserstoff aus weit entfernte Quellen (hier 430 km) ermöglicht aus wirtschaftlicher Sicht somit ein tragfähiges Geschäftsmodell. Dieses wird derzeit unter anderem von der H2Mobility umgesetzt, die auf diese Weise die existierenden 75 PKW-Tankstellen in Deutschland versorgt.

Seitens der Literatur herrscht jedoch Einigkeit darüber, dass die zur Wasserstoffherzeugung verwendete Energie unbedingt aus erneuerbaren Quellen stammen muss. Andernfalls ist den Klimaschutzbemühungen, um die es bei der Anschaffung von Wasserstoffbussen unter anderem geht, kein Nutzen erbracht.



Konzepterstellung für eine Wasserstoffinfrastruktur im Großraum Freiburg (AP6)

Abb. 74 TCO von Konzept 4.2 (SBG)

LCOHy EL

Da in diesem Konzept die Wasserstoffversorgung durch externe Anlieferung erfolgt, entfällt dieser Abschnitt.

7.5 Zwischenfazit Konzeptbewertung

Im Ergebnis der untersuchten Konzepte für die finale Ausbaustufe lassen sich die nachfolgenden drei Kernaussagen für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur zur Versorgung von Bussen im Großraum festhalten:

- Aus ökonomischen Gründen sollte die Wasserstofferzeugung in einer zentralen Erzeugungsanlage im Großraum Freiburg erfolgen, von der wo mehrere Verbraucher versorgt werden
- Aus ökologischen Gründen sollte der für die Wasserstofferzeugung benötigte Strom vollständig aus erneuerbaren Energien stammen
- Aus ökonomischen Gründen sollte ein möglichst großer Anteil des benötigten Stroms in einer eigenen EE-Erzeugungsanlage produziert werden (Stichwort: Vermeidung von Stromumlagen und Netzentgelten)

Auf diese Weise können TCO von 4,36 €/km (SBG) bzw. 4,38 €/km (VAG) erreicht werden. Durch eine gemeinsame Errichtung und Nutzung einer zentralen Tankstelle für beide Busunternehmen könnten die Investitions- und Betriebskosten zudem weiter gesenkt werden. Ob sich dies auch positiv auf die TCO auswirken würde, hängt von eventuellen Mehrkosten durch zusätzliche Anfahrten zu einer solchen zentralen Tankstelle ab. Dies wurde in diesem Projekt nicht betrachtet, sollte im Fall einer Realisierung jedoch untersucht werden.

In AP 4 wurde die Verlässlichkeit und eine hohe Verfügbarkeit von Wasserstofftankstellen als wichtig eingestuft. Um diese zu garantieren, könnten für kritische Bauteile gegebenenfalls Redundanzen (z.B. zwei Wasserstoffverdichter, von denen nur einer dauerhaft betrieben wird) geschaffen werden. Dies ist in der Konzeptbetrachtung dieses Projekts nicht berücksichtigt und würde sich ggf. auf die TCO auswirken.

Es wird in diesem Projekt davon ausgegangen, dass der Umstieg auf Busse mit Brennstoffzellenantrieb schrittweise erfolgt. Zu Beginn würde vermutlich eine kleine Anzahl von etwa 5 Bussen mit Brennstoffzellenantrieb beschafft werden. Die Errichtung einer eigenen Wasserstofferzeugungsanlage und einer eigenen Tankstelle

für diese Fahrzeuge wäre unverhältnismäßig aufwendig und teuer. Eine kostengünstigere Möglichkeit wäre die Errichtung einer öffentlich zugänglichen Wasserstofftankstelle, die neben PKW (700 bar Technik) auch Busse (350 bar Technik) versorgen kann. Die H2Mobility bietet derzeit ein Finanzierungsmodell an, bei dem Verbraucher (hier Busunternehmen) sich lediglich an den Mehrkosten für den Aufbau der 350 bar Technik beteiligen. Betrieb und Wartung der Tankstelle werden durch die H2Mobility übernommen.

Diese Variante ermöglicht für Busunternehmen einen vergleichsweise unkomplizierten Einstieg in den Betrieb von Wasserstoffbussen ohne in auswendige Infrastruktur investieren zu müssen. Auf diese Weise ist, z.B. nach Ablauf einer Probephase von einem Jahr, ein Verkauf der Busse und Wechsel auf eine andere Antriebstechnologie theoretisch möglich. Die öffentliche Tankstelle könnte anschließend durch andere Verbraucher genutzt werden.

In dieser Konzepterstellung und -bewertung wurde lediglich die Infrastruktur in einer frühen Anfangsphase sowie in der finalen Ausbaustufe untersucht. Der zeitlich dazwischen liegende schrittweise Aufbau wurde nicht berücksichtigt. Aus der Literatur ist bekannt, dass der Aufbau einer Tankstelleninfrastruktur, und damit einhergehend die Beschaffung von Brennstoffzellenbussen, in möglichst wenigen, möglichst großen Schritten erfolgen sollte. Einerseits lassen sich durch die koordinierte Beschaffung einer größeren Anzahl Fahrzeuge die Investitionskosten reduzieren. Andererseits kann die Auslastung der Infrastruktur zu jedem Zeitpunkt bestmöglich gewährleistet werden, was die spezifischen Kosten pro Einheit Wasserstoff reduziert.

Ebenfalls unberücksichtigt in dieser Konzepterstellung sind mögliche Wartungs- und Ausfallzeiten der Infrastruktur. Insbesondere letztere lassen sich durch eine redundante Auslegung kritischer Komponenten minimieren, was bei einer geplanten Realisierung berücksichtigt werden sollte.

Die Simulationsergebnisse sind aufgrund der knappen Projektlaufzeit nicht mit Hilfe einer Optimierungsalgorithmus optimiert worden. Dies sollte vor einer Errichtung gemacht werden, um die optimale Auslegung der unterschiedlichen Anlagenkomponenten zu perfektionieren.

Durch die aktuelle Diskussion über die Luftverschmutzung in Großstädten, insbesondere durch den Ausstoß von Stickstoffdioxid durch Dieselfahrzeuge, aber auch durch die Notwendigkeit von stärkerem Klimaschutz, wächst – unterstützt durch entsprechende Klimaschutzgesetze (bspw. Clean Vehicle Directive der EU) – auch bei kommunalen Betreibern des öffentlichen Personennahverkehrs das Bewusstsein für eine umweltfreundliche und lokal emissionsfreie Mobilität.

Im Projekt FrHyBus wurden deshalb im Großraum Freiburg die Busstrecken des ÖPNV hinsichtlich ihres Potenzials für eine (teilweise) Umrüstung auf Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb analysiert. Weiteres Ziel war die Erstellung eines Konzepts für eine (teilweise) Umrüstung von Diesel- auf Brennstoffzellen-Busse inklusive eines ersten sinnvollen Erprobungsschrittes und inklusive eines Konzeptes für die Wasserstoff-Versorgung. Das Projekt wurde vom Fraunhofer ISE durchgeführt mit Unterstützung durch die assoziierten Partner Freiburger Verkehrs AG (VAG), die SBG SüdbadenBus GmbH (SBG) und Stadt Freiburg im Breisgau.

Zur Ermittlung des Potenzials für Wasserstoffbussen wurde eine Analyse der Umläufe für die Busse der VAG und der SBG in Freiburg und Umland durchgeführt. Die VAG deckt zum überwiegenden Teil den innerstädtischen Verkehr der Stadt Freiburg ab; die SBG deckt den Regionalverkehr zwischen Freiburg und Umland und innerhalb des Umlandes ab. Damit bedienen diese beiden Betreiber den Großteil der aktuell existierenden Buslinien in Freiburg und Umland. Die Analyse berücksichtigt dabei Umlaufstrecken, Mehrverbräuche durch Heizung / Klimatisierung und Steigungen sowie einen Reichweitenpuffer von 15 %. Die Betriebshöfe beider Betreiber befinden sich in Freiburg, wobei die SBG auch einige Abstellflächen im Umland betreibt.

„abwärtskompatibel“ – kann auch die links gelegenen Strecken versorgen



| | Batterie | Brennstoff- zelle | BEB mit BZ-REX | Aktuell nicht zu versorgen |
|-----------------------|------------|----------------------|-------------------|-------------------------------|
| SBG Anzahl Umläufe | 4 | 15 | 14 | 3 |
| SBG Streckenlänge | 392 km/d | 2.623 km/d | 2.939 km/d | 731 km/d |
| VAG Anzahl Umläufe | 24 | 12 | 4 | 1 |
| VAG Streckenlänge | 1.913 km/d | 2.064 km/d | 878 km/d | 271 km/d |

Tab. 40 Ergebnisübersicht
der Potenzialanalyse;
dargestellt sind Umläufe im
Winter (Heizung)

Die Analyse der Umläufe ergibt für die VAG einen Anteil von 39 % der im Projekt betrachteten Umläufe (und Bussen) bei denen Wasserstoff aufgrund der Reichweite einen Mehrwert erzeugt. Dies entspricht ca. 63 % der gefahrenen Strecken der VAG (an einem Werktag zur Schulzeit) und 17 Bussen.

Der Einsatz von Pantographladern kann die Reichweite von Batteriebusen erhöhen, und daher die Anzahl der Strecken, auf denen Wasserstoffbusse einen Reichweitenmehrwert haben, senken. Aufgrund der hohen Kosten für eine

Gelegenheitslade-Infrastruktur und den notwendigen Pausenzeiten an diesen Ladepunkten ist dies jedoch nicht uneingeschränkt sinnvoll. Zur Quantifizierung des Potenzials für Pantographlader wird eine umfangreiche Detailanalyse Auswahl potenzieller Pantograph-Standorte auf Basis von Pausenzeiten, Stromnetzen und Umlaufanzahl auf dieser Haltestelle benötigt. Für diese Art der Analyse lagen jedoch für das Projekt keine ausreichenden Daten vor – das Potenzial zur Reichweitenverlängerung für Pantographlader ist daher in der Analyse NICHT berücksichtigt. Wir vermuten daher, dass die Anzahl eingesetzter Wasserstoffbusse für die VAG etwas niedriger sein wird, als in diesem Projekt ermittelt.

Für die SBG ergibt die Analyse einen Anteil von 78% der Umläufe (und Bussen) bei denen Wasserstoff aufgrund der Reichweite einen Mehrwert erzeugt. Dies entspricht ca. 82 % der gefahrenen Strecken der VAG (an einem Werktag zur Schulzeit) und 28 Bussen.

Für die SBG wird aufgrund des weitläufigen Einsatzgebietes mit Schwerpunkt auf das Freiburger Umland und der ländlich geprägten Stromnetzinfrastuktur angenommen, dass Gelegenheitslader ökonomisch nicht sinnvoll sind und die im Projekt ermittelten Zahlen sich nur durch technologische Fortschritte bei Batteriebussen verändern. Zusätzlich existieren derzeit drei Umläufe der SBG, für die die Reichweite der Brennstoffzellenbusse unter den angenommenen Randbedingungen nicht ausreichend ist. Die für diese Strecken notwendige Mehrreichweite ist jedoch so gering, dass davon ausgegangen werden kann, dass diese Umläufe durch den technologischen Fortschritt in den nächsten Fahrzeuggenerationen oder durch eine leichte Anpassung der Umläufe auch durch Wasserstoffbusse abgedeckt werden können.

Prinzipiell können Wasserstoff-Busse sämtliche Strecken (bis auf die o.g. sehr langen Umläufe der SBG) abdecken. Auf Basis der in der Literatur aktuell publizierten Gesamtkosten (TCO) von verschiedenen Bustypen (Batterie mit Gelegenheitslader, Batterie mit Übernachladung, Brennstoffzellenbusse, Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender) wird jedoch angenommen, dass die Betreiber von Busflotten bei geringen Umlauflängen vor allem Batteriebusse einsetzen und Wasserstoff-Busse primär dort, wo die Reichweite von Batteriebussen nicht ausreichend ist. Für Wasserstoffbusse wird unterschieden zwischen Brennstoffzellenbussen und Batteriebussen mit Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-REX). Letztere weisen gemäß Literatur leicht geringere Gesamtkosten auf als reine Brennstoffzellenbusse. (vgl. Kapitel 0).

Es ist jedoch wichtig zu erwähnen, dass es zu BZ-REX-Bussen bislang nur eine sehr geringe Anzahl an Literaturquellen gibt, sodass die Datenlage als nur bedingt aussagekräftig eingestuft wird.

Darüber hinaus weist die Literatur einen großen Schwankungsbereich hinsichtlich der Kosten auf und die Kosten von Wasserstoffbussen werden zu 60 % von den Kraftstoffkosten verursacht. Eine Senkung der Wasserstoff-Gestehungskosten – die durch Regularien, Kostensenkungen von EE oder Skaleneffekte der Wasserstoffherzeugungsanlage beeinflusst werden, können – auch kurzfristig - die TCO von Wasserstoffbussen senken.

Für eine erste Einführung von Bussen schlagen wir eine geringe Anzahl Busse bei SBG und ggf. auch VAG vor, welche anfangs vor allem an öffentlichen PKW-Wasserstofftankstellen betankt werden. Diese Lösung kann für Freiburg vermutlich 2 bis 10 der insgesamt 44 mögliche H₂-Busse an 2 bis 3 öffentlichen Tankstellen versorgen und ist ein kosteneffizienter erster Schritt, der auch zusätzlich die Einführung einer Wasserstoff-PKW-Infrastruktur begünstigt, wenngleich möglicherweise eine Anpassung der Umläufe und Betriebsabläufe für einen kleinen Teil der Umläufe nötig werden könnte. Die Bereitschaft hierzu wurde bspw. durch die SBG bereits kommuniziert, wobei zu klären ist, wie viele Fahrzeuge wirklich aufgrund der notwendigen Anpassung der Betriebsabläufe außerhalb getankt werden können. Es ist

zu erwähnen, dass die ASF Freiburg derzeit in Verhandlungen mit der H2Mobility über die Errichtung einer solchen Tankstelle nach dem gleichem Modell (Mitnutzung einer 700 bar-PKW-H₂-Tankstelle für schwere Nutzfahrzeuge) steht und vermutlich nur eine limitierte Anzahl der für Deutschland insgesamt maximal 400 Wasserstoff-PKW-Tankstellen durch die H2Mobility in Freiburg gebaut wird. Das hier vorgeschlagene Modell zur Mitnutzung der ersten BZ-Busse von öffentlichen PKW-Tankstellen wird also vermutlich eine Maximalgrenze erreichen und kann mit den Bestrebungen der ASF konkurrieren.

Für eine vollständige Umstellung auf Batterie- und Brennstoffzellenbusse ergibt sich eine Anzahl von insgesamt bis zu 44 Wasserstoff-Bussen für die Region Freiburg. Diese verursachen einen Wasserstoff-Bedarf von 317 t/a (alle Wasserstoff-Busse werden als Range-Extender angeschafft) bis 407 t/a (alle Wasserstoff-Busse werden als Brennstoffzellenbus angeschafft), der relativ konstant anfällt, jedoch durch Schulferien, sowie Sonn- und Feiertage leichten Schwankungen unterliegt. Es wird aufgrund der Datenlage und den Gesprächen mit VAG und SBG vermutet, dass eine Betankung überwiegend an Betriebshöfen stattfindet. Für die Betankungsanlage sind dabei voraussichtlich ca. 217 m² - 252 m² (zzgl. Abstellfläche für den Bus und zeitweise Abstellfläche für den Gastrailer) notwendig, für eine Onsite-Elektrolyseanlage wäre zusätzlich ein Flächenbedarf von 108 m² erforderlich. Diese Spannbreite ergibt sich durch die Möglichkeit eine größere Anzahl an Betankungssäulen aufzustellen als bislang vorhanden ist, um den Betriebsablauf aufgrund der längeren Betankungszeiten weniger einzuschränken. Diese Berechnung beinhaltet nur einen Ein-Tagesvorrat an Wasserstoff, bei Mehrbedarf erhöht sich der Platzbedarf.

Diese Flächen sind laut Aussage der Betreiber jedoch aktuell nicht auf den Betriebshöfen verfügbar. Der Aufstellort der Betankungsanlage sollte daher mit den nun vorliegenden Daten vertieft geprüft werden.

Seitens der SBG werden jedoch aktuell 26 Busse außerhalb des Freiburger Betriebshofes im Umland auf insgesamt 9 Abstellflächen stationiert. Diese Fahrzeuge fahren nur jeden zweiten Tag an den Betriebshof und tanken an öffentlichen Tankstellen, da eine eigene Betankungsanlage für die geringe Fahrzeuganzahl nicht sinnvoll ist. Die Betankung dieser Fahrzeuge mit Wasserstoff ist zum derzeitigen Zeitpunkt eine Herausforderung!

Wir schlagen hier vor, zusammen weiteren Akteuren Wasserstoff-PKW- oder -LKW-Tankstellen im Freiburger Umland zu erschließen, um diese Busse wie bisher auch an öffentlichen Tankstellen zu versorgen. Zum jetzigen Zeitpunkt ist primär die H2-Mobility in dem Bereich aktiv, die sich eine Versorgung von bis zu 10 Wasserstoffbussen an deren Tankstellen vorstellen kann, sofern dies bei der Errichtung schon berücksichtigt wurde. Wir empfehlen daher vor allem zu Beginn eines Umstiegs auf Brennstoffzellenbusse die Abstimmung mit der H2Mobility, um einen Teil dieser Fahrzeuge außerhalb Freiburgs zu versorgen. Diese Vorgehensweise wird jedoch nicht alle Fahrzeuge abdecken können – für die restlichen Fahrzeuge empfehlen wir eine übergangsweise Nutzung der bereits laufenden dieselbetriebenen Fahrzeuge solange bis die Wasserstoff-Infrastruktur flächendeckend weiter ausgebaut ist.

Eine Versorgung des zuvor genannten Wasserstoffbedarfes von 317 t/a bis 407 t/a wird aufgrund der im Vergleich höheren Wasserstoff-Erzeugungskosten und des höheren Platzbedarfes (vgl. Kapitel 7.4.2.5 und 7.4.2.6) mit großer Wahrscheinlichkeit NICHT durch Onsite-Elektrolyse geschehen. Stattdessen werden ein bis zwei Gastrailer pro Tag und Betriebshof die Wasserstoffversorgung sicherstellen. Aufgrund der hohen Lieferfrequenz bzw. dem Wasserstoffverbrauch vermuten wir, dass eine Wasserstoffherstellung im Freiburger Umland die geringsten Kosten verursacht – zumindest solange keine regionale oder überregionale Wasserstoff-Pipeline-Infrastruktur existiert. Ein Beispiel dafür kann eine 2 - 3 MW_{el}-Elektrolyse-Anlage mit 24/7 Betrieb in Umkirch, Fessenheim oder einem ähnlich nahe gelegenen und gut angeschlossenen Industriegebiet sein. Eine entsprechende (in diesem Projekt in der

Auslegung nicht optimierte) Anlage könnte für einen vollen Rollout bereits heute grünen Wasserstoff in einer Kombination aus PV-Strom und grünem Netzstrom für 6 bis 8 €/kg erzeugen und damit vermutlich zu TCOs von 4,30-4,50 €/km führen. Geringere Kosten sind auch heute schon denkbar durch Nutzung von Optimierungspotenzialen (bspw. Betrieb nur zu Zeiten günstigen Stroms (bspw. ca. 70% der Zeit), Bündelung mit weiteren Wasserstoffverbrauchern (bspw. ASF) und Nutzung der resultierenden Skaleneffekte oder Nutzung von Wasserstoff aus einer bereits geplanten 10 MW_{el}-Wasserkraft-Elektrolyse-Anlage in Grenzach / Wyhlen) sowie einen möglichst großen Anteil direkt genutzter erneuerbarer Energien. Dies muss ökonomisch im Einzelfall näher untersucht werden.

Zusammenfassung und
Handlungsempfehlung

Im Projekt FrHyBus wurden Potenziale und Konzepte für die Realisierung einer kleinen Einführungsflotte sowie für das maximale Ausbaupotenzial von Wasserstoff-Bussen in der Region Freiburg dargestellt.

Der dazwischen liegende Weg von einigen ersten Fahrzeugen hin zu einer emissionsneutralen Flotte mit einem hohen Teil an Wasserstoffbussen wurde in diesem Projekt nicht betrachtet und sollte nachgelagert näher analysiert werden. Es wird empfohlen für die Wasserstoffversorgung entweder auf bestehende / bereits in Planung befindliche Wasserstoff-Erzeugungsanlagen zurückzugreifen, oder übergangsweise konventionellen Wasserstoff in Kombination mit Grünwasserstoff-Zertifikaten (noch in den letzten Zügen der Erprobung und noch nicht auf dem Markt verfügbar!) zu verwenden. Alternativ kann der Aufbau der Erzeugungsanlage modular gestaltet werden und dabei auch die Kapazitäten der PKW-Tankstellen aus der ersten Einführung mit genutzt werden. Durch den modularen Aufbau sind aber höhere Investitionskosten erwartbar.

Für die drei Umläufe, deren Länge mit der aktuellen Wasserstoff-Busgeneration nur knapp oder nicht ganz bedienbar ist, empfehlen wir die Umstellung einige wenige Jahre zu verzögern, da man vermuten kann, dass mittelfristig zukünftige Busgenerationen mit vermutlich höheren Reichweiten die Versorgung dieser Strecken mit Wasserstoff-Bussen ermöglicht.

9 Quellenangaben

- [1] Ally, J. and Pryor, T. 2016. Life cycle costing of diesel, natural gas, hybrid and hydrogen fuel cell bus systems: An Australian case study. *Energy Policy* 94, 285–294.
- [2] Altenburg, S. and Eckert, S. 2017. *Nullemissionsnutzfahrzeuge. Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökonomischen Alternative.*
- [3] Bernward Janzing. 2020. Freiburger VAG profitiert von Elektro-Bus-Förderung - kleine Betriebe nicht. *Badische Zeitung* (Jan. 2020).
- [4] Berthold, K. 2018. *Techno-ökonomische Auslegungsmethodik für die Elektrifizierung urbaner Busnetze.* Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie.
- [5] *Broschuere-ZAwheel.*
- [6] Burmeister, J. 2018. E-Busse: Bestellungen nehmen Fahrt auf. *Der Nahverkehr* 38 (Mar. 2018), 13–19.
- [7] CaetanoBus. *H2.City Gold.* <http://caetanobus.pt/en/buses/h2-city-gold/>. Accessed 20 November 2019.
- [8] Daimler. 2019. *Der Mercedes-Benz eCitaro. Lokal emissionsfrei und fast geräuschlos.* <https://www.daimler.com/innovation/case/electric/ecitaro.html>. Accessed 21 October 2019.
- [9] Dolman, M. 2018. *Strategies for joint procurement of fuel cell buses. A study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking.* Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking.
- [10] Ebusco. *The Ebusco 3.0.* <https://www.ebusco.com/wp-content/uploads/Brochure-3.0.pdf>. Accessed 21 October 2019.
- [11] Ebusco. *The New Ebusco 2.2.* https://www.ebusco.com/wp-content/uploads/EBUSCO_brochure_2-2_digi.pdf. Accessed 21 October 2019.
- [12] electrive.net. 2018. *Heliox: 13-MW-Ladeinfrastruktur für E-Busse in Betrieb.* <https://www.electrive.net/2018/03/28/heliox-13-mw-ladeinfrastruktur-fuer-e-busse-in-betrieb/>. Accessed 20 August 2019.
- [13] electrive.net. 2018. *Start für europäisches H2-Bus-Projekt JIVE 2.* <https://www.electrive.net/2018/01/27/start-fuer-europaeisches-h2-bus-projekt-jive-2/>. Accessed 16 August 2019.
- [14] Gilbert, F. 2018. Gamme Safrabus Nova. Bientôt à l'hydrogène ! *Autocar & Bus*, 179, 12–15.
- [15] Hof, E. and Kupferschmid, S. *Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV. Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte.* thinkstep AG.
- [16] HyCologne. *Projekt JIVE.* <https://www.hycologne.de/projekt-jive/>. Accessed 16 August 2019.

- [17] Knote, T. 2017. *E-Bus-Standard. Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse*. Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, Dresden.
- [18] Kraftfahrtbundesamt. Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) 01. Januar 2018.
- [19] Kraftfahrtbundesamt. Omnibusse. Ein Fahrzeugsegment auf konstantem Niveau 01. Januar 2014.
- [20] Kußmaul, H. Kostenrechnung. In *Betriebswirtschaft für Führungskräfte - Eine Einführung für Ingenieure, Naturwissenschaftlicher, Juristen und Geisteswissenschaftlicher*, 255–291.
- [21] Lajunen, A. and Lipman, T. 2016. Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses. *Energy* 106, 329–342.
- [22] Lemaire, V. 2018. Bus à hydrogène: la stratégie de Safran porte ses fruits. *Bus & Car*, 1048, 36.
- [23] Mineralölwirtschaftsverband e.V. 2019. *Tankstellenbestand*. <https://www.mwv.de/statistiken/tankstellenbestand/>. Accessed 23 July 2019.
- [24] Miranda, P.E.V. de, Carreira, E. S., Icardi, U. A., and Nunes, G. S. 2017. Brazilian hybrid electric-hydrogen fuel cell bus: Improved on-board energy management system. *International Journal of Hydrogen Energy* 42, 19, 13949–13959.
- [25] Müller, K. K. 2017. *Clean Hydrogen in European Cities - CHIC*.
- [26] Netinform.net. *CaetanoBus H2.City Gold (2019)*. <https://www.netinform.net/h2/h2mobility/detail.aspx?ID=568>. Accessed 20 November 2019.
- [27] Netinform.net. 2016. *Solbus-HyMove fuel cell bus (2016)*. <https://www.netinform.net/h2/h2mobility/detail.aspx?ID=546>. Accessed 20 November 2019.
- [28] New Flyer. *xcelior Charge H2*. <https://www.newflyer.com/site-content/uploads/2019/05/Xcelior-CHARGE-H2-web.pdf>. Accessed 20 November 2019.
- [29] Nurhadi, L., Borén, S., and Ny, H. 2014. A Sensitivity Analysis of Total Cost of Ownership for Electric Public Bus Transport Systems in Swedish Medium Sized Cities. *Transportation Research Procedia* 3, 818–827.
- [30] O'Donovan, A. 2018. *Electric buses in Cities. Driving towards cleaner air and lower CO2*.
- [31] Otte, C. 2018. *40 Wasserstoffbusse für Kölner und Wuppertaler Verkehrsunternehmen*. <https://www.njuuz.de/beitrag42198.html>. Accessed 30 July 2019.
- [32] Pia Gängrich. 2018. *Wieso wir mehr Dieselsebusse kaufen, während alle von Dieselfahrverboten sprechen*. <https://dialog.hochbahn.de/bus-in-zukunft/wieso->

wir-mehr-dieselbusse-kaufen-wenn-alle-von-dieselfahrverboten-sprechen/
Accessed 23 July 2019.

Zusammenfassung und
Handlungsempfehlung

- [33] Polenjournal.de. 2017. *Ursus präsentiert einen neuen Bus mit Wasserstoffantrieb*. <https://www.newflyer.com/site-content/uploads/2019/05/Xcelsior-CHARGE-H2-web.pdf>. Accessed 20 November 2019.
- [34] PWC. E-Bus-Radar. Die Zukunft des öffentlichen Nahverkehrs? Omnibusse - ein Fahrzeugsegment auf konstantem Niveau.
- [35] Reuter, B., Faltenbacher, M., Schuller, O., Whitehouse, N., and Whitehouse, S. 2017. *New Bus Refuelling for European Hydrogen Bus Depots. High-Level Techno-Economic Project Summar Report*. thinkstep AG.
- [36] Rogge, M. 2014. *Potentiale und technologische Optionen für vollelektrische Busse im ÖPNV. Batterietag NRW*.
- [37] Schwertner, M. *Energetischer Systemvergleich von Diesel-, Hybrid- und Elektrobussen*. DOI=10.3929/ETHZ-B-000206395.
- [38] Sustainable Bus. 2018. *2019 will be the year of Solaris Urbino 12 hydrogen*. <https://www.sustainable-bus.com/fuel-cell/solaris-bus-coach-fuel-cell-bus-urbino-12-hydrogen-2019/>. Accessed 30 July 2019.
- [39] VAG Freiburg. 2019. *E wie Elektro: Informationen rund unsere zukünftigen E-Busse*. <https://blog.vag-freiburg.de/e-busse/>. Accessed 20 August 2019.
- [40] van Hecke, G. 2018. *Fuel Cell Electric Bus. It works and it's ready*, Brüssel.
- [41] VDV Die Verkehrsunternehmen. 2019. *E-Bus-Projekte in Deutschland*. <https://www.vdv.de/e-bus-projekt.aspx>. Accessed 21 November 2019.
- [42] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. 2018. *VDV-Statistik 2017*.