




Erlebnis Bremerhaven
Gesellschaft für Touristik,
Marketing und Veranstaltungen mbH

A circular photograph of a white hydrogen fuel cell hybrid bus. The bus has a green and blue graphic on its side with a water drop and the text 'Wasserstoff - Der Energieträger der Zukunft im Null-Emission'. Below that, it says 'Brennstoffzellen-Hybrid-Bus'. The bus is parked on a street with trees in the background.

Machbarkeitsstudie Einsatz von H₂-Bussen auf der Hafen-Liner-Linie

Im Auftrag der Erlebnis Bremerhaven GmbH

© Stefan Eckert/Sphera

Auftraggeber: Erlebnis Bremerhaven GmbH
Titel: Machbarkeitsstudie Einsatz von H₂-Hybrid Bussen auf der Hafen-Liner-Linie
Berichtsversion: v1.4
Berichtsdatum: 30.06.2020

© Sphera Solutions GmbH

Im Namen der Sphera Solutions GmbH und ihrer Tochtergesellschaften:

Bericht erstellt von

Stefan Kupferschmid

skupferschmid@sphera.com

Telefon +49-711-341817-254

Dr. Stefan Eckert

seckert@sphera.com

Telefon +49-711-341817-473

Qualitätsgeprüft von

Dr. Stefan Eckert

seckert@sphera.com

Projektleiter

Telefon +49-711-341817-473

Dieser Bericht wurde von Sphera mit der angemessenen Sachkompetenz und Sorgfalt unter den im Vertrag zwischen Sphera und dem Kunden vereinbarten Bedingungen angefertigt. Sphera ist weder dem Kunden noch anderen Parteien gegenüber verantwortlich in Bezug auf Angelegenheiten, welche den für das Projekt vereinbarten Rahmen überschreiten.

Ungeachtet jedweder Vertraulichkeit des Berichts übernimmt Sphera keinerlei Verantwortung gegenüber Dritten, denen dieser Report (oder Teile davon) zugänglich gemacht wird. Solche Parteien stützen sich auf eigenes Risiko auf den Bericht. Interpretationen, Analysen oder Aussagen jedweder Art durch Dritte liegen außerhalb von Spheras Verantwortungsbereich.

Sollten Sie Anregungen, Beschwerden, oder sonstiges Feedback diesen Bericht betreffen haben, wenden Sie sich bitte an servicequality@sphera.com.

DOKUMENTINHALT UND REFERENZEN

Dieses Dokument stellt eines der Ergebnisse des Projektes DESTI-SMART "Effizienter, nachhaltiger Tourismus mit kohlenstoffarmen Verkehrsinnovationen durch nachhaltige Mobilität, Zugänglichkeit und verantwortungsbewusstes Reisen" dar. In dem Projekt DESTI-SMART, das durch das Programm INTERREG Europa 2020 für Europäische territoriale Zusammenarbeit finanziert wird, ist die Seestadt Bremerhaven als einer von 10 Partnern beteiligt.

Diese Studie wurde im Hinblick auf Aktivität 8 durchgeführt, die "Durchführbarkeitsstudien für kohlenstoffarme Mobilitätsoptionen und Transportsysteme, Zugänglichkeitsangebote, Verbesserungen der Intermodalität und Rad-/Wandermöglichkeiten an den Partnerdestinationen" erfordert.

Die Studie wurde von Dr. Stefan Eckert und Stefan Kupferschmid, Sphera Solutions GmbH, sowie Helmut Berends, Berends Consult, den externen Experten, die für die Entwicklung der Studie verantwortlich sind, in enger Zusammenarbeit mit den lokalen Stakeholdern, Bremerhaven Bus, H2BX, Stadtplanungsamt und Klimastadtbüro des Magistrats Bremerhaven im Rahmen des DESTI-SMART Projekts durchgeführt. Alle Inhalte dieses Dokuments beziehen sich daher ausschließlich auf die Ziele und Aktivitäten des Projekts DESTI-SMART. Jede andere Verwendung und das vollständige oder teilweise Zitieren der Inhalte durch Dritte muss ausdrücklich die Quelle zitieren und den Autor von allen möglichen Konsequenzen freistellen.

Delivering **E**fficient **S**ustainable **T**ourism with low-carbon transport **I**nnovations:
Sustainable **M**obility, **A**ccessibility and **R**esponsible **T**ravel

DESTI-SMART
Interreg Europe

 European Union
European Regional
Development Fund

Lead Partner



Advisory Partner
BU Bournemouth
University

<https://www.interregeurope.eu/desti-smart/>

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	4
Abbildungsverzeichnis.....	6
Tabellenverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis.....	8
1. Einführung.....	9
1.1. Hintergrund und Zielstellung	9
1.2. Vorgehensweise.....	9
2. Bestandsaufnahme.....	11
3. Technische Machbarkeit.....	12
3.1. Verfügbare Fahrzeugmodelle und Antriebskonzepte.....	12
3.2. Energiebedarf der Fahrzeuge	13
3.3. Energieversorgungsinfrastruktur	15
3.3.1. Wasserstoff	15
3.3.2. Strom.....	17
3.4. Fahrzeugversorgung	18
4. Umwelteffekte.....	19
4.1. Schadstoffemissionen	19
4.2. Treibhausgasemissionen.....	19
5. Wirtschaftlichkeit	23
5.1. Kapitalwertmethode und Randbedingungen	23
5.2. Ergebnisse	24
6. Umsetzung.....	26
6.1. Stakeholder Beteiligung.....	26
6.2. Qualifikationsbedarf	27
6.3. Anpassungen Werkstatt und Abstellung.....	28
6.4. Ausblick: Gesamtumstellung der Busflotte	29
7. Risiken und Empfehlungen	30
7.1. Fahrzeugverfügbarkeit.....	30
7.2. H ₂ -Versorgung.....	30

7.3.	Kosten	31
7.4.	Zeitverzögerungen und technische Probleme.....	32
7.5.	Stakeholder-Beteiligung.....	32
7.6.	Mitarbeiterqualifikation	32
7.7.	Werkstatt und Abstellung.....	32
7.8.	Einbindung in weitere regionale Wasserstoffkonzepte	33
7.9.	Projekttablauf	33
	Literaturverzeichnis.....	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Linienverlauf Hafen-Liner	11
Abbildung 3-1: Übersicht der betrachteten Antriebskonzepte.....	13
Abbildung 3-2: Geplante Standorte des IWES-Elektrolyseurs (gelb) und der H2 MOBILITY Tankstellen (grün).....	16
Abbildung 4-1: Lebenszyklus eines Wasserstoffbusses inklusive Rohstoffgewinnung, Materialherstellung, Produktion, Nutzung und Herstellung des Energieträgers (thinkstep, 2019).....	20
Abbildung 4-2: Treibhausgasemissionen des Hafen-Liners über die Lebensdauer von 12 Jahren bei Verwendung von konventionellem Netzstrom und dem aktuellen H ₂ -Mix von H2 MOBILITY.	22
Abbildung 5-1: Vergleich der Annuitäten für die Umstellung der drei Busse des Hafen-Liners	25
Abbildung 6-1: Qualifizierungsstufen für Tätigkeiten an HV-Fahrzeugen (DGUV-Information 200-005, 2012 (BGHM - Berufsgenossenschaft Holz und Metall, 2012); derzeit in Überarbeitung)	28
Abbildung 7-1: Projektablauf zur Einführung von Wasserstoffbussen.....	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Umlaufdaten der Bremerhaven Bus AG	11
Tabelle 3-1:	Verfügbarkeit von Wasserstoff-Gelenkbussen	12
Tabelle 3-2:	Spezifischer Energiebedarf für den Hafen-Liner und im Netz.....	14
Tabelle 3-3:	Berechneter, täglicher Energiebedarf für Hafen-Liner und Gesamtflotte	15
Tabelle 4-1:	Einsparpotenzial an lokalen Schadstoffemissionen über die Nutzungsdauer der Fahrzeuge	19
Tabelle 4-2:	Einsparungspotential an Treibhausgasemissionen über die gesamte Haltedauer der Fahrzeuge unter Verwendung von grüner Energie (Mittelwert BZ- und BZ-REX-Fahrzeuge)	22

Abkürzungsverzeichnis

ATEX	Explosionsschutz (<i>franz.: ATmosphères Explosibles</i>)
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (<i>engl.: Battery Electric Vehicle</i>)
BZ	Brennstoffzelle (hier: Brennstoffzellen-Hybrid-Fahrzeug)
BZ-REX	Brennstoffzellen-Range-Extender (hier: Batterieelektrisches Fahrzeug mit einer Brennstoffzelle zur Reichweitenverlängerung)
CCS	Kombiniertes Ladesystem (<i>engl.: Combined Charging System</i>)
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalente (<i>engl.: CO₂-equivalents</i>)
Desti-Smart	Effizienter, nachhaltiger Tourismus mit kohlenstoffarmen Verkehrsinnovationen: Nachhaltige Mobilität, Barrierefreiheit und verantwortungsbewusstes Reisen (<i>engl.: Delivering Efficient Sustainable Tourism with low-carbon transport Innovations: Sustainable Mobility, Accessibility and Responsible Travel</i>)
GaBi	Ganzheitliche Bilanzierung
GAP	Gasanlagenprüfung
GWP	Treibhauspotential (<i>engl.: Global Warming Potential</i>)
H ₂	Wasserstoff
H2BX	Wasserstoff für die Region Bremerhaven e.V.
HV	Hochvolt
ISO	Internationale Organisation für Normung (<i>engl.: International Organization for Standardization</i>)
JIVE	Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe (EU-Projekt zur Einführung von Wasserstoffbussen)
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
LCA	Ökobilanz (<i>engl.: Life Cycle Assessment</i>)
NO _x	Stickoxide
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PM	Partikelemissionen (<i>engl.: Particulate Matter</i>)
VdTÜV	Verband der Technischen Überwachungsvereine
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen

1. Einführung

1.1. Hintergrund und Zielstellung

Um das zunehmende Mobilitätsbedürfnis in den wachsenden Ballungsräumen in Deutschland und Europa möglichst nachhaltig befriedigen zu können, wird ein leistungsfähiger öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) benötigt. Energieeffizienz und Umweltfreundlichkeit sind dabei von zentraler Bedeutung, um einen kostengünstigen Betrieb und gleichzeitig eine hohe Lebensqualität für die Bewohner zu gewährleisten. Vor dem Hintergrund anhaltender Überschreitungen der NO_x- und Feinstaubgrenzwerte in mehreren Städten und darauf bezogener Klagen von Umweltverbänden sowie anhängiger EU-Vertragsverletzungsverfahren wird die Reduktion der lokalen Abgasemissionen auch für den ÖPNV immer dringlicher. Bei innerstädtischen Buslinien in Ballungszentren gewinnen daher Nullemissionskonzepte, d. h. Antriebstechnologien ohne lokale Schadstoffemissionen, zunehmend an Bedeutung. So haben die im Rahmen der Initiative C40 in einem internationalen Netzwerk zusammengeschlossenen Städte (darunter Metropolen wie Paris, London, Los Angeles, Barcelona, Mexico City, Rom und Tokyo) eine Umstellung ihrer Busflotten auf emissionsfreie Antriebe beschlossen und wollen ab dem Jahr 2025 ausschließlich emissionsfreie Busse anschaffen (C40 Cities, 2018). Auch viele weitere Städte und Gemeinden engagieren sich für emissionsfreie Fahrzeuge im Nahverkehr.

Die Studie wird im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten Projekts Desti-Smart durchgeführt, mit dem eine verbesserte Verkehrs- und Tourismuspolitik in Urlaubsgebieten etabliert werden soll. Als ein Arbeitsschwerpunkt sollen CO₂-arme Verkehrssysteme bereitgestellt werden, die die Bedürfnisse von Touristen berücksichtigen. Die externen Kosten des Verkehrs sollen internalisiert und durch eine Verlagerung auf CO₂-arme Verkehrsmittel und Elektromobilität reduziert werden.

In diesem Zusammenhang hat die Stadt Bremerhaven die Beschaffung von (mindestens) drei Wasserstoffbussen beschlossen. Diese sollen auf der neuen Linie Hafen-Liner eingesetzt werden, die seit 2019 das Busangebot in Bremerhaven ergänzt und die mit dem Hauptbahnhof, dem Schaufenster Fischereihafen und den Havenwelten mehrere Touristenschwerpunkte verbindet.

Mit der vorliegenden Machbarkeitsstudie sollte eine Entscheidungsgrundlage erstellt werden, um die Durchführbarkeit der Umstellung auf wasserstoffbetriebene Fahrzeuge und deren Auswirkungen zu untersuchen. Dabei sollten relevante technische, wirtschaftliche und organisatorische Aspekte einbezogen und die mit der Umstellung verbundenen Risiken dargestellt werden. Dabei sollen die spezifischen lokalen Randbedingungen berücksichtigt und ein Kostenvergleich mit dem derzeitigen Linienbetrieb gezogen werden. Anhand der Ergebnisse sollen Handlungsempfehlungen und mögliche Optimierungsvorschläge abgeleitet werden.

1.2. Vorgehensweise

Im Vorgespräch wurde festgelegt, die Untersuchung technologieoffen für Brennstoffzellenhybrid-Busse (BZ) und für Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-REX) durchzuführen.

Als Ausgangsbasis für die Bewertung des Einsatzes von Brennstoffzellenbussen diente die Bestandsaufnahme des derzeitigen Hafen-Liner-Betriebs (Kapitel 2). Anschließend wurde zunächst die technische Machbarkeit anhand des Energiebedarfs, der Fahrzeugversorgung sowie der Energiebereitstellung in Kapitel 3 untersucht. Kapitel 4 widmet sich der Bewertung der Umweltwirkungen des Einsatzes der BZ- bzw.

BZ-REX-Fahrzeuge. Anschließend wurde in Kapitel 5 eine überschlägige Kostenabschätzung für die Umstellung des Hafens-Liners auf Wasserstoffbusse vorgenommen. Die Umsetzung in Kapitel 6 beleuchtet wichtige organisatorische Aspekte der Umstellung in Bezug auf Fahrzeugversorgung, Platzbedarf, und Wartungsabläufe. Abschließend werden in Kapitel 7 grundlegende Risiken bei Projekten zur Einführung von alternativen Antrieben in Busflotten dargestellt und entsprechende Handlungsempfehlungen für eine erfolgreiche Umstellung der Hafens-Liner-Linie auf Wasserstoffantrieb abgeleitet.

2. Bestandsaufnahme

Insgesamt sind in Bremerhaven etwa 75 Fahrzeuge im Linieneinsatz. Beim Großteil der Fahrzeuge handelt es sich um Gelenkbusse (62 Fahrzeuge), nur elf Fahrzeuge sind Solobusse.

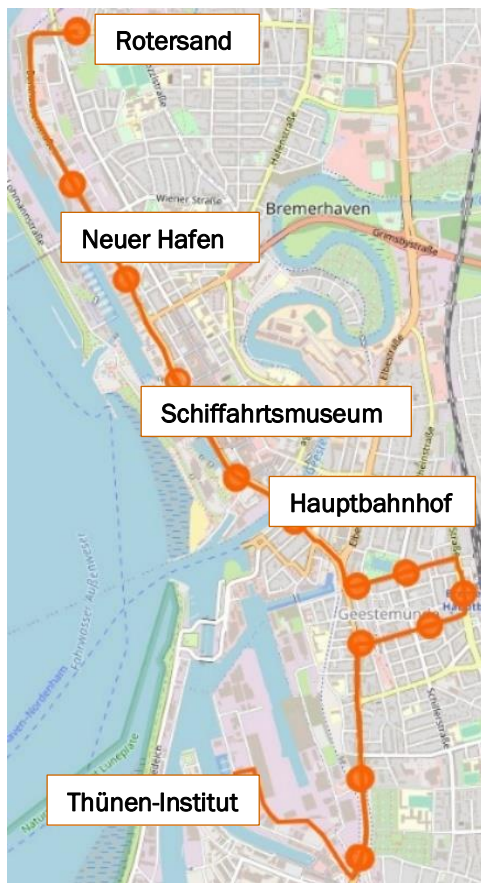


Abbildung 2-1: Linienvverlauf Hafen-Liner

Der Hafen-Liner verläuft zwischen den Haltestellen Rotersand und Thünen Institut und verbindet die maritimen Attraktionen von Bremerhaven und den Hauptbahnhof. Die Linie wird von Montag bis Samstag von sechs Uhr morgens bis kurz nach Mitternacht nahezu durchgehend alle 30 Minuten bedient. An Sonn- und Feiertagen verkehren die Busse von zehn Uhr morgens bis Mitternacht, wobei der Takt zwischen 11 Uhr und 19 Uhr auf 20 Minuten verkürzt ist, um die erhöhte Fahrgastzahl an Wochenenden bedienen zu können. Bei einer Fahrzeit von 24 Minuten erfolgen die Umläufe werktags linienrein mit zwei Bussen¹, während an Wochenenden ein drittes Fahrzeug benötigt wird. Die Umläufe des Hafen-Liners werden durchgehend mit Gelenkfahrzeugen bedient, wobei bislang konventionelle Diesibusse zum Einsatz kommen.

Tabelle 2-1 zeigt die wesentlichen Eckdaten des Hafen-Liners sowie für das Gesamtnetz, die zur Bestimmung des Energiebedarfs (spezifisch und absolut) und als Input für die Umwelt- und Kostenbewertung herangezogen werden.

Tabelle 2-1: Umlaufdaten der Bremerhaven Bus AG

	Hafen-Liner	Netz
Durchschnittliche Fahrleistung pro Einsatztag	217 km (Montag) ²	194 km
Angenommene Fahrzeugverfügbarkeit	85 %	85 %
Resultierende Jahreslaufleistung je Fahrzeug	68.167 km	60.000 km
Durchschnittsgeschwindigkeit	15,46 km/h	17,27 km/h

¹ Ein Umlauf repräsentiert die gefahrene Strecke eines Fahrzeugs ab dem Ausrücken aus dem Depot bis zu seiner erneuten Abstellung. Linienrein bedeutet, dass der Bus bei einem Umlauf ausschließlich auf einer Linie fährt.

² An Samstagen bzw. an Musiksommer-Donnerstagen sowie an Feiertagen, die nicht auf Samstag oder Sonntag fallen, erhöht sich die vom Hafen-Liner gefahrene Strecke auf 279 km. Dadurch fällt die Jahreslaufleistung etwas höher aus als sich aus der durchschnittlichen Umlauflänge und der Fahrzeugverfügbarkeit (in Tagen) ergibt.

3. Technische Machbarkeit

3.1. Verfügbare Fahrzeugmodelle und Antriebskonzepte

Als Hafen-Liner werden ausschließlich Gelenkbusse eingesetzt. Aktuell sind jedoch keine 18 m Brennstoffzellenfahrzeuge am Markt verfügbar. In der folgenden Tabelle wird daher eine Übersicht aller früher bereits eingesetzten, ehemals geplanten oder von den Herstellern angekündigten wasserstoffbetriebenen Gelenkbusmodelle und ihrer voraussichtlichen Lieferfähigkeit gegeben. Neben den BZ-Hybridbussen werden Brennstoffzellen-Range-Extender-Konzepte (BZ-REX) ebenfalls berücksichtigt, da entsprechende Fahrzeuge von EvoBus und New Flyer in naher Zukunft als Gelenkbusvariante auf den Markt kommen sollen. Die BZ-REX-Technologie wurden daher im Rahmen der Studie ebenfalls betrachtet.

Tabelle 3-1: Verfügbarkeit von Wasserstoff-Gelenkbussen

Modell	Technologie	Ort/Region	(geplante) Marktverfügbarkeit	Bewertung
APTS/VDL/ Vossloh-Kiepe	BZ-REX	Münster	2019	Ausschließlich 12 m Erprobungsfahrzeug im Einsatz. Unklar, ob Konzept weiterverfolgt wird.
ebe/Autosan	BZ	Wiesbaden, Mainz	(2018)	Fahrzeuge waren bereits bestellt, Lieferung jedoch nicht absehbar. Unklar ob Konzept weiterverfolgt wird
Hyzon Motors	BZ	USA	(2022)	Reservierung möglich, Marktverfügbarkeit Europa unklar.
Mercedes-Benz eCitaro G REX	BZ-REX	Deutsch- land	2021	Erste Vorbestellungen wurden getätigt.
New Flyer Excelsior charge H2 60	BZ-REX	USA	2020	Marktverfügbarkeit Europa unklar.
Solaris BZ-Oberlei- tung-Hybrid	BZ-REX	Riga	2020	Ausschließlich Oberleitungshybrid, kein 18 m BZ-Hybrid vorgesehen
Solaris Urbino 18,75 electric mit Brennstoffzelle	BZ-REX	Hamburg	2014	Erprobungsfahrzeuge, Konzept eingestellt, Modell nicht mehr verfügbar.
Van Hool Exqui.City 18 FC	BZ	Pau	2019	Acht Erprobungsfahrzeuge im Einsatz. Spezielles BRT-System, nicht für den normalen Linieneinsatz geeignet.
Wrightbus	BZ	Europa	2022/2023	Geplante Marktverfügbarkeit als Gelenkbus.

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass derzeit nur bei wenigen Modellen eine Markteinführung geplant ist, jedoch erst 2021/2022. Basierend auf den Erfahrungen in den europäischen Wasserstoffbus-Projekten

JIVE/JIVE 2 ist die Entwicklung eines Wasserstoffbusses komplex, so dass nennenswerte Stückzahlen unter Umständen erst weit nach der geplanten Markteinführung eines Modells zur Verfügung stehen bzw. regulär bestellt werden können. Dies sollte bei der Umstellungsplanung berücksichtigt werden.

Abbildung 3-1 gibt einen Überblick über die beiden betrachteten Wasserstoff-Antriebstechnologien. Bei Brennstoffzellenhybridfahrzeugen (BZ) wird der an Bord gespeicherte Wasserstoff³ in einer Brennstoffzelle in Strom umgewandelt. Die Betankung ähnelt dabei dem Tankvorgang eines konventionellen Erdgas-Fahrzeugs. Er erfolgt mit komprimiertem Wasserstoff über eine Zapfsäule und dauert typischerweise – je nach Tankgröße und Konfiguration der Tankstelle – zwischen fünf und zehn Minuten (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018). Die Betankungszeit eines konventionellen Dieselmotors liegt bei etwa fünf Minuten (dena, 2018). Die für den Antrieb notwendige Energie wird hier primär durch den Wasserstoff bereitgestellt.

Daneben entwickelt EvoBus den BZ-REX als batterieelektrisches Fahrzeug mit Brennstoffzelle als Range-Extender. Hierbei handelt es sich um ein klassisches Batteriefahrzeug (BEV) mit externer Lademöglichkeit, welches zusätzlich mit Wasserstofftanks und einer Brennstoffzelle ausgestattet ist. Dies ermöglicht die Kombination der Vorteile der BEV (hoher Wirkungsgrad) und der BZ-Fahrzeuge (hohe Reichweite). Allerdings muss damit auch die Infrastruktur für beide Energieträger - Ladeinfrastruktur für Strom und Betankungsinfrastruktur für Wasserstoff – vorgehalten werden.

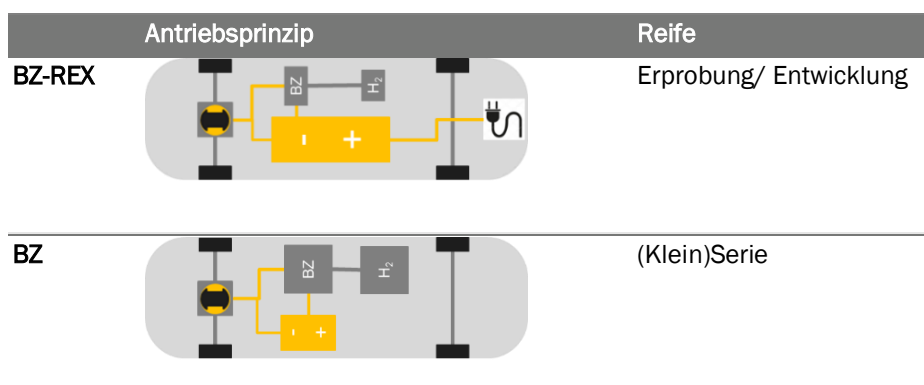


Abbildung 3-1: Übersicht der betrachteten Antriebskonzepte

3.2. Energiebedarf der Fahrzeuge

Zur Ermittlung des Energiebedarfs der BZ-REX-Fahrzeuge kann Sphera auf detaillierte Simulationsergebnisse der EvoBus GmbH zurückgreifen. Basis der Analyse sind die von Bremerhaven Bus zur Verfügung gestellten Umlaufdaten (Umlaufgeschwindigkeit und -länge). Für die Abschätzung des täglichen Wasserstoffbedarfs, welcher die Anforderungen an die Infrastruktur beschreibt, wird dabei von einer Worst-case-Betrachtung ausgegangen, damit unter allen Umständen die Energieversorgung der Fahrzeuge sichergestellt ist. Bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen kommt dem Energiebedarf für Heizung und Klimatisierung eine besondere Rolle zu. Da Brennstoffzellen im Betrieb Abwärme erzeugen, ist der Winterbetrieb von BZ-Bussen im Vergleich zu batterieelektrischen Fahrzeugen weniger kritisch. Aus diesem Grund wird als Worst-case der Energiebedarf der Fahrzeuge im Sommerbetrieb (Vollklimatisierung nach VDV) betrachtet.

³ In Bussen wird der Wasserstoff typischerweise bei 350 bar gespeichert. Im Pkw-Bereich sind 700 bar üblich.

Die Energiebedarfsanalyse für die BZ-REX-Fahrzeuge basiert auf den folgenden Fahrzeugdaten entsprechend der Herstellerangaben:

- Batterietechnologie: Feststoffbatterie mit Festkörper-Polymer als Elektrolyt)
- Kapazität der HV-Batterie: 252 kWh (davon 226 kWh nutzbar)
- Speicherkapazität Wasserstoff: 25 kg H₂ nutzbar
- Antriebsleistung Elektromotoren: max. 250 kW
- Leistung der Brennstoffzelle: 30 kW

Die Berechnung des Verbrauchs der BZ-Fahrzeuge basiert auf der Energiebedarfsbestimmung der BZ-REX Fahrzeuge. Der Strombedarf des BZ-REX wird mit einem angenommenen Wirkungsgrad des elektrischen Antriebsstrangs von 73 % auf die Energie am Rad bezogen und anschließend unter Berücksichtigung eines angenommenen mittleren Wirkungsgrad des BZ-Systems von 50 % auf den resultierenden Wasserstoffbedarf umgerechnet. Die Summe der beiden H₂-Verbräuche ergibt dann den Wasserstoffverbrauch der BZ-Busse.⁴

Tabelle 3-2 zeigt den spezifischen Energiebedarf für den Hafen-Liner und das gesamte Netz. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass der Energiebedarf der BZ-REX-Fahrzeuge von dem Energiemanagement und der Dimensionierung der Komponenten Batterie und Brennstoffzelle abhängt. Fahrzeuge mit einer anderen Konfiguration und einem anderen Energiemanagement können eine deutlich andere Verteilung zwischen Strom- und H₂-Bedarf aufweisen.

Tabelle 3-2: Spezifischer Energiebedarf für den Hafen-Liner und im Netz

		Hafen-Liner		Netz	
		Gelenkbus		Solobus	
Diesel	Diesel [l/100km]	52	52	38	
BZ-REX	H ₂ [kg/100km]	8,4	7,8	5,2	
	Strom [kWh/100km]	69,1	64,6	41,2	
BZ	H ₂ [kg/100km]	12,2	11,4	7,8	

Eines der Fahrzeuge des Hafen-Liners wird unter der Woche im Netz eingesetzt, wo es im Mittel geringere Fahrleistungen bei einer höheren Durchschnittsgeschwindigkeit (vgl. Tabelle 2-1) und somit geringerem spezifischen Verbrauch (Tabelle 3-2) zurücklegt. Dies wirkt sich insgesamt jedoch nur geringfügig auf den täglichen Wasserstoffbedarf der drei Fahrzeuge aus. In der nachfolgenden Tabelle ist der tägliche Energiebedarf der beiden H₂-Fahrzeugtypen (sowie für das Dieselreferenzfahrzeug) in den beiden Szenarien dargestellt. Für den Hafen-Liner ist der Maximalbedarf (vgl. Fußnote 2) dargestellt.

⁴ Der hier vereinfacht vorgenommene Ansatz geht von einer ausschließlichen Nutzung der Energie für den Antrieb aus, unter Vernachlässigung von Nebenaggregaten und Klimatisierung. Dieses vereinfachte Vorgehen führt zu tendenziell höheren H₂-Verbrauchswerten, da eigentlich nur ein Teil der eingesetzten Energie in Form von Wasserstoff tatsächlich allen Verlusten entsprechend der Wirkungsgradkette des Antriebsstranges unterliegt.

Tabelle 3-3: Berechneter, täglicher Energiebedarf für Hafen-Liner und Gesamtflotte

		Hafen-Liner	Gesamtflotte
Diesel	Diesel [l/Tag]	435	7.160
BZ-REX	H ₂ [kg/Tag]	70	1.061
	Strom [kWh/Tag]	579	8.720
BZ	H ₂ [kg/Tag]	102	1.556

3.3. Energieversorgungsinfrastruktur

3.3.1. Wasserstoff

Hafen-Liner

Auf Basis des täglichen Energiebedarfs lässt sich der Bedarf für die H₂-Infrastruktur ableiten. Für die Betrachtung des Hafen-Liners wurde dabei primär überprüft, ob die vorgesehene H₂-Tankstelle von H₂ MOBILITY verwendet werden kann.

Die von H₂ MOBILITY geplante Wasserstofftankstelle an der Autobahnauffahrt Bremerhaven-Wulstdorf⁵ soll – Stand heute – sowohl über 700 bar (Pkw) als auch über eine 350 bar-Betankungsmöglichkeit verfügen (Schott, 2020). Die 350 bar-Technologie ist Stand der Technik bei den Bussen und somit notwendig, um neben der Pkw- auch eine Busbetankung durchführen zu können. Die Tankstelle soll über eine Wasserstoffkapazität von 200 kg täglich verfügen. Rein rechnerisch ist damit der tägliche maximale Wasserstoffbedarf der BZ-Hafen-Liner-Busse (70 kg bzw. 102 kg, siehe Tabelle 3-3) problemlos abdeckbar. Sofern diese Wasserstoffmenge dort täglich durch die Busse abgerufen wird, würde die Kapazität der Tankstelle für andere Anwendungen (Pkw, Lkw oder andere Nfz) auf etwa 100 kg H₂ sinken. Dies würde weiterhin eine Betankung von etwa 20 BZ-Pkw täglich ermöglichen⁶, was zum derzeitigen Zeitpunkt als ausreichend angesehen wird. Dies könnte sich jedoch bei einer höheren Dichte an BZ-Pkw oder der zusätzlichen Betankung von BZ-Lkw als limitierend erweisen.

Gesamtnetz:

Für eine potentielle weitere bzw. komplette Umstellung der Busflotte auf Wasserstoffantrieb wäre möglichst eine eigene Wasserstofftankstelle auf dem Betriebshof zu realisieren, die über eine tägliche Betankungskapazität von circa 1.100 kg H₂ (BZ-REX) bzw. 1.600 kg H₂ (BZ) verfügt. Die öffentlichen Tankstellen mit der heute geplanten Kapazität von etwa 200 kg H₂ wären hierfür nicht mehr ausreichend. Zudem bietet eine eigene Betriebshoftankstelle deutliche Vorteile in Punkto Betriebsabläufe. Eine Versorgung der gesamten Flotte auf einer öffentlichen Tankstelle ist nur schwierig zu organisieren.

Für eine eigene Betriebshoftankstelle mit der oben genannten Kapazität kann mit einem Platzbedarf von etwa 550-650 Quadratmetern (zuzüglich der Tankspuren für die Fahrzeuge) im Depot gerechnet werden. Eine erste Prüfung der Platzverhältnisse mittels Google-Maps zeigt, dass hierfür genügend Platz auf dem Betriebshofgelände zur Verfügung steht. Im Detail ist dies jedoch zu prüfen – insbesondere hinsichtlich der notwendigen Sicherheitsabstände und Schutzmaßnahmen. Nähere Informationen zur Technik von

⁵ Des Weiteren ist ein Tankstellenstandort in der Grimsbystraße in unmittelbarer Nähe zum Busdepot im Gespräch. Dieser Standort wird für den Hafen-Liner nicht mit betrachtet, da die weitere Entwicklung zum Zeitpunkt der Studiererstellung nicht absehbar ist. Aufgrund der Nähe zum Busdepot ist dieser Standort jedoch aus betrieblichen Gesichtspunkten vorteilhaft gegenüber dem Standort Bremerhaven-Wulstdorf.

⁶ Aktuelle Pkw-Brennstoffzellenmodelle verfügen über eine Tankkapazität von 4-6 kg H₂ (H₂MOBILITY, 2020).

Wasserstofftankstellen können dem von Sphera entwickelten Leitfaden „Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV – Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte“ entnommen werden (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018).

Die eigene Tankstelle muss dann auch ausreichend mit Wasserstoff versorgt werden. Dazu gibt es verschiedene Projekte zur Erzeugung von Wasserstoff, die momentan in der Region Bremen und Bremerhaven diskutiert werden:

- Elektrolyseure des Fraunhofer IWES auf dem Gelände des ehemaligen Flugplatzes Luneort. Geplant sind dort momentan Anlagen mit einer Leistung von 2 MW (Bremerhaven Green Economy, 2020). Damit soll rund täglich eine Tonne Wasserstoff hergestellt werden, womit die Anlage als alleinige H₂-Bezugsquelle für die Gesamtflotte nur im Fall der BZ-REX ausreicht.
- Grüne Wasserstoffherzeugung am Standort Mittelsbüren ab 2021. Die hier diskutierte Projektidee sieht eine schrittweise Kapazitätserweiterung der Elektrolyseure auf bis zu 300 MW bis 2030 vor. Der erzeugte Wasserstoff soll zum einen zur Dekarbonisierung des Stahlsektors sowie zur Belieferung an Mobilitätsanwendungen verwendet werden (Ingaver, 2020).



Abbildung 3-2: Geplante Standorte des IWES-Elektrolyseurs (gelb) und der H₂ MOBILITY Tankstellen (grün)

Im Rahmen der Konzeption einer eigenen Betriebshoftankstelle bleibt zu klären, inwiefern und zu welchen Konditionen die für Bremerhaven Bus notwendigen Wasserstoffmengen aus diesen regionalen Projekten zur Verfügung gestellt werden können.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, perspektivisch bei einer Gesamtumstellung der Flotte selbst Wasserstoff mittels Elektrolyse auf dem Betriebshof herzustellen. Die dabei resultierenden H₂-Kosten hängen wesentlich vom Strompreis ab, mit dem der Wasserstoff hergestellt wird. Angesichts der derzeitigen Strompreisgestaltung erweist sich diese Lösung jedoch zumindest unter den gegebenen Rahmenbedingungen in der Regel als unwirtschaftlich.⁷ Die technische und wirtschaftliche Machbarkeit wäre im Rahmen einer weiterführenden Studie detaillierter zu untersuchen.

3.3.2. Strom

Hafen-Liner

Für die Versorgung der BZ-REX-Fahrzeuge wird neben der H₂-Tankstelle eine Ladeinfrastruktur benötigt. Typischerweise wird für jedes Fahrzeug eine separate Lademöglichkeit vorgesehen, um die volle betriebliche Flexibilität zu gewährleisten. Im Busbereich hat sich im Wesentlichen der CCS-Stecker zur Ladung von batterieelektrischen Fahrzeugen durchgesetzt.⁸

Bei etwa 14 Betriebsstunden täglich sind rund zehn Stunden für das Laden der Fahrzeuge auf dem Betriebshof verfügbar. Mit der oben genannten Fahrzeugkonfiguration würde bei voller Ausnutzung der Standzeit zum Laden eine mittlere Ladeleistung von etwa 25 kW theoretisch ausreichen. Für die weitere Betrachtung wird von einer installierten Ladeleistung von 50 kW je Fahrzeug ausgegangen, um hier einen ausreichenden Zeitpuffer zu gewährleisten. Eine noch höhere Ladeleistung ist aus betrieblicher Sicht nicht notwendig und würde zu höheren Kosten führen. Für die drei Hafen-Liner-Busse ergibt sich damit eine Leistung von insgesamt 150 kW, die am Depot zusätzlich zur Verfügung gestellt werden muss. Dies ist nach Auskunft von Bremerhaven Bus mit dem derzeitigen Anschluss möglich, ohne dass eine Erweiterung des Netzanschlusses erforderlich ist.

Für die Hafen-Liner-Linie wird daher vom Aufbau von drei Ladesäulen mit jeweils 50 kW ausgegangen. Der Platzbedarf hierfür beschränkt sich im Wesentlichen auf die Ladesäule selbst. Typische Ladesäulen mit einer Ladeleistung von 50 kW benötigen eine Fläche von etwa einem Quadratmeter. Zur Sicherstellung von Fluchtwegen zwischen abgestellten Fahrzeugen kann der tatsächliche Platzbedarf – je nach Abstellkonzept – jedoch erheblich höher sein, was bei der Planung berücksichtigt werden muss.

Gesamtnetz:

Für die Umstellung der kompletten Flotte ist – bei ebenfalls 50 kW Ladeleistung je Fahrzeug – in Summe eine Anschlussleistung von etwa 3,7 MW nötig. Für Leistungsanforderungen im unteren MW-Bereich wird typischerweise ein Anschluss an das lokale Mittelspannungsnetz nötig. Hier ist zwingend frühzeitig mit dem örtlichen Energieversorger bzw. Stromnetzbetreiber zu klären, ob diese Leistung am Betriebshof durch das lokale Versorgungsnetz zur Verfügung gestellt werden kann und/oder Netzertüchtigungsmaßnahmen dafür nötig sind. Dies wäre Gegenstand einer vertieften Untersuchung zur Gesamtflottenumstellung.

Für die Errichtung der Ladeinfrastruktur ist zudem zu überprüfen, ob die Abstellhallen unter Berücksichtigung von Fluchtwegen ausreichend Platz für eine vollständige Ausstattung aller Standplätze mit Ladesäulen bieten. Ggf. ist hier auf eine Stromzuführung von oben auszuweichen. Alternativ könnte sich eine gemischte Flotte aus BZ-REX- und BZ-Fahrzeugen erwogen werden, so dass nur für einen Teil der Fahrzeuge eine Ladeinfrastruktur vorzuhalten wäre.

⁷ Gemäß der jüngst veröffentlichten Nationalen Wasserstoffstrategie (BMWi, 2020) wird die Befreiung der Produktion von grünem Wasserstoff von der EEG-Umlage angestrebt, was die Wirtschaftlichkeit einer Eigenelektrolyse signifikant verbessern würde.

⁸ Eine weitere Möglichkeit ist das Laden der Fahrzeuge über einen Pantographen. Dies wird jedoch vorrangig bei Gelegenheitsladung von Bussen entlang der Strecke verwendet und findet bei reinen Depotladern in der Regel keine Anwendung.

3.4. Fahrzeugversorgung

Der Fahrplan des Hafens-Liners zeigt im Wesentlichen die folgenden Einsatzzeiten:

- Montag – Freitag:
 - Im Normalfall: 05-19 Uhr: 14 Betriebsstunden
 - An Musiksommer Donnerstag, freitags und vor Wochenfeiertagen: 05-00 Uhr: 19 Betriebsstunden
- Samstag: 05-00 Uhr: 19 Betriebsstunden
- Sonn- und feiertags: 10-00 Uhr: 14 Betriebsstunden

Somit ergeben sich rein rechnerisch eine Zeit von mindestens fünf Stunden (in Einzelfällen an Musiksommer-Donnerstagen, freitags und vor Wochenfeiertagen) und maximal zehn Stunden, die das Fahrzeug auf dem Betriebshof steht und die somit zur Versorgung (Tanken und Laden) der Fahrzeuge zur Verfügung steht. Der Ladevorgang mit bis zu 50 kW ist somit unter allen Umständen ausreichend, um die Batterie der BZ-REX-Fahrzeuge über Nacht aufzuladen.

Das Betanken der Fahrzeuge erfolgt momentan durch das reguläre Werkstattpersonal im Rahmen der Fahrzeugversorgung. Somit können bei Bedarf auch Reparaturen an den Fahrzeugen getätigt werden, um diese für den Folgetag einsatzbereit zu machen. Der Versorgungsvorgang umfasst folgende Tätigkeiten:

- Betankung
- Durchfahrt Waschanlage
- Kleinere Kontrollaufgaben
- Abstellung in der Fahrzeughalle

Insgesamt werden hierfür etwa 15 Minuten Zeit kalkuliert (Angaben Bremerhaven Bus). Im Falle der Betankung der Wasserstofffahrzeuge der Hafens-Liner-Linie muss zusätzliche Zeit für die Fahrt zur Tankstelle angesetzt werden. Für die Tankstelle in Bremerhaven Wulstdorf (vgl. Abbildung 3-2) sind 16 zusätzliche Fahrkilometer (ab Depot) notwendig und damit etwa 20 Minuten zusätzliche Fahrzeit je Bus. Dies ließe sich durch eine Integration des Betankungsvorgangs in die Fahrerdienstpläne reduzieren, so dass die Betankung beispielsweise direkt nach Beendigung des täglichen Umlaufs erfolgen könnte.

Aus betrieblicher Sicht deutlich vorteilhafter für die Betankung der Busse wäre der diskutierte Tankstellenstandort Ecke Hexenbrücke zur Auffahrt auf die Bundesstraße B 212. Dieser Standort liegt in unmittelbarer Nähe zum Busbetriebshof wodurch sich der bisherige Betriebsablauf nahezu vollständig beibehalten ließe.

4. Umwelteffekte

Luftqualität und Klimawirkung verschiedener Bustechnologien sind der einer der Haupttreiber für den Einsatz emissionsfreier Fahrzeuge im ÖPNV. Zudem bieten Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb (somit auf Fahrzeuge mit Brennstoffzelle) Vorteile hinsichtlich der entstehenden Lärmemissionen, was sich insbesondere in Gegenden mit geringer Verkehrsbelastung, wo der Bus somit den Hauptverkehr darstellt, bemerkbar macht. Für die Luftqualität bzw. die gesundheitlichen Auswirkungen von Luftschadstoffen auf den Menschen ist die lokale Konzentration der Schadstoffe ausschlaggebend. Der Ort des Schadstoffausstoßes ist somit maßgeblich. Aus diesem Grund werden für die Betrachtung der Luftschadstoffemissionen (Stickoxid- und Partikelemissionen) ausschließlich die lokalen Emissionen während des Betriebs der Busse miteinander verglichen. Im Gegensatz dazu ist der Ort des Ausstoßes von Treibhausgasen für das Klima unerheblich. Deshalb werden die Klimaauswirkungen der Wasserstoffherzeugung und -nutzung auf Basis einer Lebenszyklusanalyse bestimmt.

Für die Betrachtung der Lebenszyklusemissionen bzw. der kumulierten Einsparung der drei Gelenkfahrzeuge wird die jeweils mittlere Laufleistung pro Jahr (Hafen-Liner bzw. Flotte) und eine Haltedauer von 12 Jahren sowie die in Tabelle 2-1 dargestellten Jahreslaufleistungen angenommen.

4.1. Schadstoffemissionen

Unter Verwendung der neuesten HBEFA-Emissionsfaktoren (INFRAS, 2019) stößt ein moderner Euro VI Dieselgelenkbus bei der angenommenen Fahrleistung und der mittleren Durchschnittsgeschwindigkeit der Hafen-Liner-Linie jährlich gut 42 kg NO_x aus. Durch die komplette Umstellung des Hafen-Liners auf lokal emissionsfreie Wasserstofftechnologien (BZ oder BZ-REX) können somit jährlich rund 127 kg NO_x eingespart.

Für Partikelemissionen (PM) beträgt die jährliche Einsparung der drei lokal emissionsfreien Fahrzeuge auf der Hafen-Liner-Linie in Summe 8 kg PM. Tabelle 4-1 zeigt das perspektivische Einsparungspotential über die gesamte Nutzungsdauer der Fahrzeuge.

Tabelle 4-1: Einsparpotenzial an lokalen Schadstoffemissionen über die Nutzungsdauer der Fahrzeuge

	Hafen-Liner	Flotte
Stickoxidemissionen (NO _x)	1.526 kg	22.481 kg
Partikelemissionen (PM)	100 kg	1.807 kg

4.2. Treibhausgasemissionen

Treibhausgasemissionen werden üblicherweise als CO₂-Äquivalente (CO₂e) angegeben. Dabei werden neben CO₂ auch andere klimarelevanten Gase (z. B. Methan) gemäß ihrer jeweiligen Klimawirkung berücksichtigt.

Wie oben erwähnt, wird für die Analyse der Treibhausgase ein Lebenszyklusansatz für die Fahrzeuge verwendet. Abbildung 4-1 zeigt dies am Beispiel eines Busses, der mit Wasserstoff betrieben wird. Die Lebenszyklusanalyse umfasst hierbei die folgenden Teilbereiche:

- Rohstoffgewinnung, Materialherstellung und Produktion der Fahrzeuge einschließlich Recycling werden auf die Lebensdauer der Fahrzeuge umgelegt
- Nutzung
- Energieträgerbereitstellung (Strom- und Wasserstoffherzeugung bzw. Dieselpbereitung)

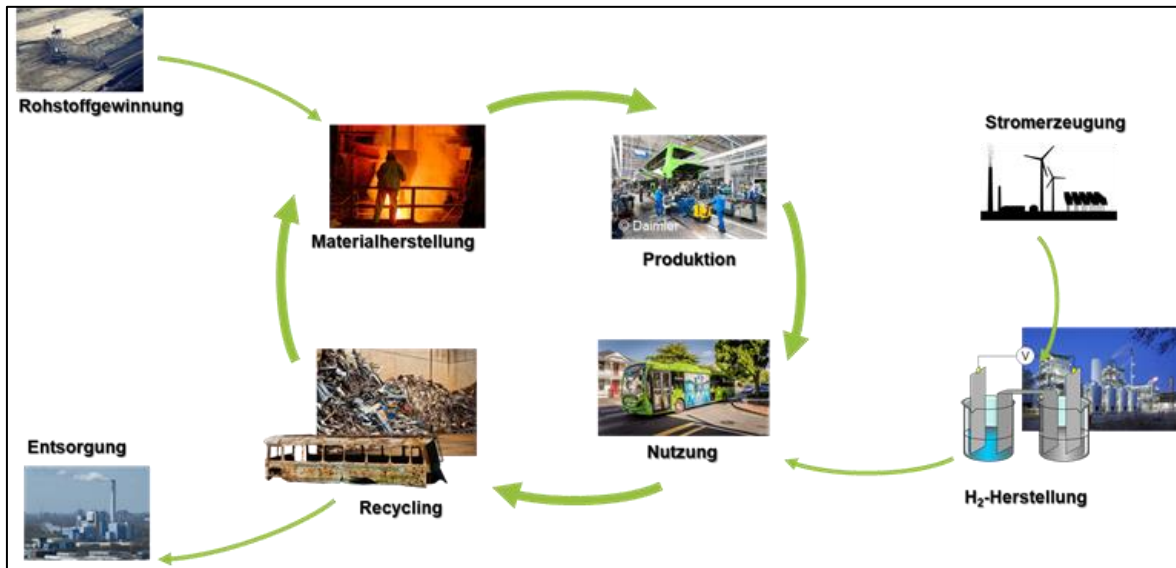


Abbildung 4-1: Lebenszyklus eines Wasserstoffbusses inklusive Rohstoffgewinnung, Materialherstellung, Produktion, Nutzung und Herstellung des Energieträgers (thinkstep, 2019)

Wasserstofffahrzeuge sind aufgrund der energieintensiven Herstellung der Brennstoffzelle und der Hochvolt-Batterie bezüglich der CO_{2e}-Emissionen bei der Produktion meist schlechter gestellt als konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Sie haben jedoch den Vorteil einer emissionsfreien Nutzungsphase. Es findet somit eine Verschiebung der Emissionen von der Nutzungsphase (konventionelle Fahrzeuge) hin zur Herstellung des Fahrzeugs und der Bereitstellung der Energieträger (Wasserstoff und/oder Strom) statt, sofern diese nicht emissionsfrei erzeugt werden.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wird davon ausgegangen, dass der Wasserstoff über die Tankstellen von H2 MOBILITY bezogen wird. Das Ziel von H2 MOBILITY ist es, langfristig grünen Wasserstoff aus der Elektrolyse von Wasser unter Nutzung von erneuerbarem Strom bereitzustellen. Momentan besteht der über die H2 MOBILITY-Tankstellen vertriebene Wasserstoff aufgrund des geringen Angebots von grünem Wasserstoff noch mehrheitlich aus grauem Wasserstoff und setzt sich wie folgt zusammen (Riepe, 2020):

- 28 % grüner Wasserstoff, erzeugt über die Elektrolyse von Wasser und aus Biomethan. Aufgrund der hohen Relevanz der Windkraft in Norddeutschland wird von der Verwendung von Windstrom ausgegangen. Für die Erzeugung aus Biomethan wird die Dampfreformierung mit Biomethaninput herangezogen.
- 30 % als Nebenprodukt aus der chemischen Industrie. Für die Zwecke der Studie wird eine Chlor-Alkali-Elektrolyse in Anlehnung an CertifHy herangezogen und 21 % des Energieinputs dem erzeugten Wasserstoff zugeschrieben (Barth, 2019). Dementsprechend werden anteilig die Umweltauswirkungen bestimmt.

- 42 % über die konventionelle Erzeugungsrouten aus Erdgas. Hier wird die Dampfreformierung als vorherrschendes Verfahren angenommen.⁹

Zum Laden der Fahrzeuge wird vom konventionellem Netzstrommix ausgegangen.

Die berücksichtigte Wartung des BZ-Fahrzeugs umfasst insbesondere den Tausch der Hauptkomponenten HV-Batterie und Brennstoffzelle. Unter Berücksichtigung der Durchschnittsgeschwindigkeit im Netz von 17,3 km/h und einer jährlichen Laufleistung von 60.000 km (siehe Tabelle 2-1) ergibt sich über 12 Jahre Lebensdauer eine Gesamtbetriebsstundenzahl der Fahrzeuge und somit der Brennstoffzelle von 42.000 Stunden. Aktuell werden Lebensdauern von Brennstoffzellensystemen von 30.000 Stunden von den Herstellern kommuniziert (Ballard, 2019), so dass danach in der Regel die Brennstoffzelle auszutauschen ist. Die getauschte Brennstoffzelle hat am Ende der Buslebensdauer jedoch nur rund 40 % ihrer Betriebszeit erreicht und kann (ggf. nach einer Aufbereitung) weiterverwendet werden. Es wird daher für die ökologische Betrachtung der Einsatz von 1,4 Brennstoffzellen während der Buslebensdauer angenommen.

Bei den BZ-REX-Bussen soll eine neuartige Festkörperbatterie mit deutlich verbesserter Haltbarkeit zum Einsatz kommen, so dass diese während der 12-jährigen Fahrzeuglebensdauer nach Auskunft von EvoBus nicht ausgetauscht werden muss. Die kombinierte Energiebereitstellung aus Batterie und Brennstoffzelle wird zudem so gesteuert, dass die Brennstoffzelle möglichst durchgehend im optimalen Betriebspunkt arbeitet. Aufgrund dieses spezifischen Betriebskonzepts kann laut EvoBus auch die Lebensdauer der Brennstoffzelle so weit verlängert werden, dass ein Austausch während der für die Studie angenommenen Fahrzeuglebensdauer von 12 Jahren nicht erforderlich ist. Die Emissionen für die Produktion der Tauschkomponenten entfallen daher.

Abbildung 4-2 zeigt Treibhausgasemissionen der drei betrachteten Fahrzeuge unter Berücksichtigung der Fahrzeugherstellung und Wartung sowie die Herstellung der Energieträger Diesel, Strom und Wasserstoff über die gesamte Nutzungsdauer der Fahrzeuge (12 Jahre). Es zeigt sich, dass durch den Betrieb von BZ-Fahrzeugen bereits unter diesen Bedingungen über den gesamten Lebenszyklus der Fahrzeuge etwa 1.090 Tonnen CO_{2e} (28 %) eingespart werden können. Bei BZ-REX Fahrzeugen reduziert sich die Einsparung auf etwa 970 Tonnen CO_{2e} (25 %).

⁹ Im Jahr 2015 wurden etwa 90 % des in Deutschland genutzten Wasserstoffs aus Kohlenwasserstoffen (hauptsächlich Erdgas) gewonnen (EY, LBST, BBH, TÜV Süd, 2016).

Treibhausgasemissionen über die Lebenszeit: Drei Gelenkbusse auf der Hafen-Liner-Linie

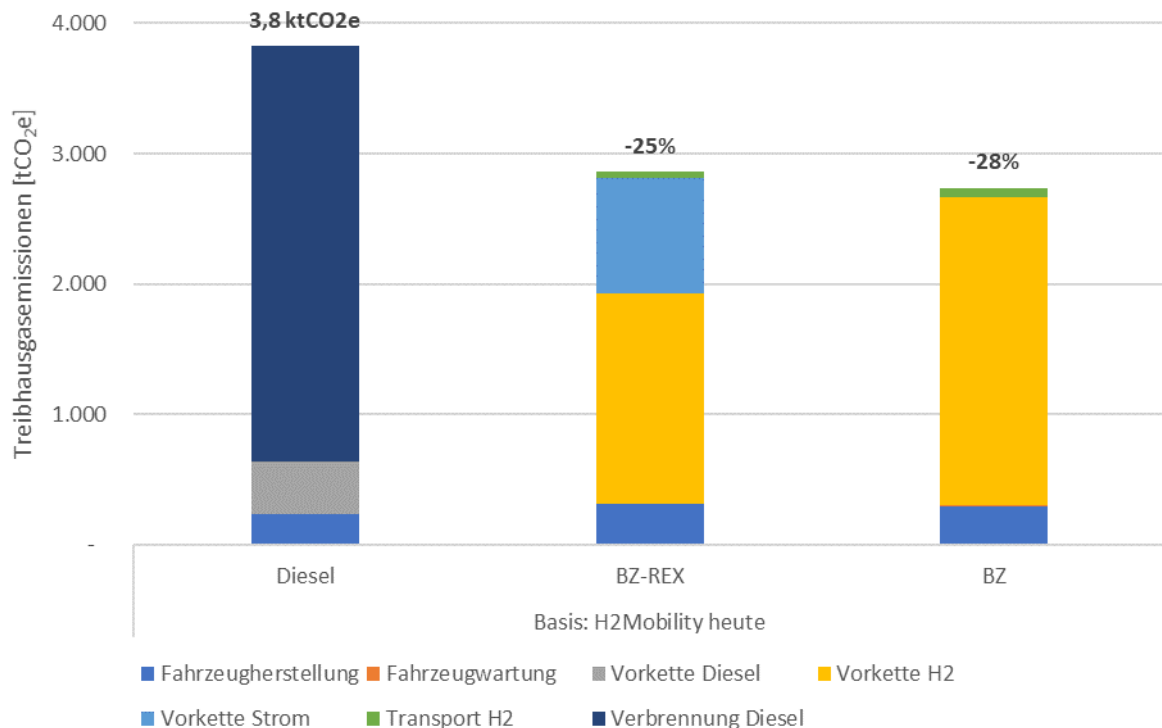


Abbildung 4-2: Treibhausgasemissionen des Hafen-Liners über die Lebensdauer von 12 Jahren bei Verwendung von konventionellem Netzstrom und dem aktuellen H₂-Mix von H2 MOBILITY.

Tabelle 4-2 zeigt das perspektivische Einsparungspotential über die gesamte Haltedauer der Fahrzeuge für den Hafen-Liner sowie für die gesamte Flotte, sofern ausschließlich Windstrom sowohl zum Laden der Fahrzeuge als auch zur Erzeugung von Wasserstoff via Elektrolyse verwendet wird.

Tabelle 4-2: Einsparungspotential an Treibhausgasemissionen über die gesamte Haltedauer der Fahrzeuge unter Verwendung von grüner Energie (Mittelwert BZ- und BZ-REX-Fahrzeuge¹⁰)

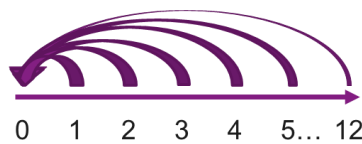
	Hafen-Liner	Flotte
Absolute Reduktion	3.200 t CO ₂ e	65.940 t CO ₂ e
Relative Reduktion	- 84%	- 83%

¹⁰ Unter Verwendung von grüner Energie ist die Reduktion der Lebenszyklusemissionen der BZ-REX Fahrzeuge im Vergleich zu Diesel um 2% höher als die der BZ-Fahrzeuge.

5. Wirtschaftlichkeit

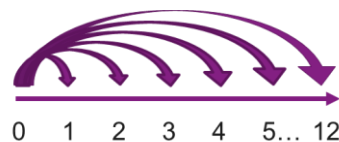
5.1. Kapitalwertmethode und Randbedingungen

Der Kostenvergleich wurde anhand des Kapitalwerts als gängigstes Verfahren zur Beurteilung von Investitionsprojekten durchgeführt. Um die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallenden Zahlungsströme vergleichbar zu machen, werden bei der Kapitalwertmethode sämtliche anfallenden Zahlungen auf das Bezugsjahr abdiskontiert.



Die Anfangsinvestition (Beschaffung der Busse und der notwendigen Infrastruktur) geht unmittelbar und in voller Höhe in den Kapitalwert ein. Dies gilt für alle zu Beginn notwendigen Ausgaben wie z. B. Werkstattumrüstung, Schulungen, etc. Es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die erforderlichen Investitionen in Fahrzeuge und Infrastruktur sowie die weiteren Anfangsausgaben alle im selben Jahr getätigt werden. Alle weiteren Kosten werden als jährliche Ausgaben auf den Anfangszeitpunkt abgezinst.

Die Ergebnisse werden als Annuität dargestellt. Dabei wird der auf den Anfangszeitpunkt bezogene Betrag (der ermittelte Kapitalwert) in eine gleichbleibende periodische Zahlung über die Betrachtungsdauer umgewandelt.



Es ist zu beachten, dass sich die Kosten zu Beginn (Anfangsinvestitionen) und in den Folgejahren (Betriebs- und Energieträgerkosten) kostenmäßig deutlich unterscheiden, während die dargestellten Annuitäten formal über den gesamten Betrachtungszeitraum identisch anfallen.

Als Betrachtungszeitraum wird die Einsatzdauer der Fahrzeuge verwendet. In Absprache mit der Verkehrsgesellschaft Bremerhaven wird eine Nutzungsdauer von 12 Jahren angesetzt. Der Restwert der Fahrzeuge am Ende ihrer Nutzung wird vereinfacht mit Null angenommen.

Der Kapitalwertvergleich für den Hafen-Liner erfolgte unter folgenden weiteren Annahmen und Rahmenbedingungen:

- Die Beschaffungskosten für Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur wurden anhand verfügbarer Preisinformationen bzw. durch Skalierung abgeleitet. Für die Wasserstoff-Gelenkbusse wurde unabhängig von der Technologievariante ein Preis von 825.000 € angenommen, für die Ladeinfrastruktur werden rund 150.000 € veranschlagt. Für die Fahrzeuge wird eine Förderung i. H. v. 60 % der Mehrkosten, für die Ladeinfrastruktur i. H. v. 60 % der Investitionen berücksichtigt. Eine Wasserstofftankstelle ist nicht erforderlich, da die Betankung ausschließlich über die H2 MOBILITY-Tankstelle erfolgt. Für die Dieselfahrzeuge wird keine Förderung berücksichtigt.
- Die Betriebskosten der Fahrzeuge sowie die Kosten für den Komponententausch bei den BZ-Bussen wurden anhand der Angaben zu Wartungsverträgen verschiedener Busbetreiber sowie Herstellerinformationen abgeschätzt. Entsprechend der in Kapitel 4 dargestellten Annahmen erfolgt der Komponententausch bei den BZ-Hybridbussen nach 30.000 Betriebsstunden, d. h. im 9. Jahr.

- Als Kosten werden für den Austausch der Brennstoffzelle und HV Batterie werden zusammen rund 130.000 € angesetzt. Der Restwert der Austauschkomponenten am Ende der Buslebensdauer in Höhe von 60 % wird gutgeschrieben und abdiskontiert. Entsprechend der Ausführungen in Kapitel 4.2 wird beim BZ-REX kein Komponententausch berücksichtigt.
- Die Lebensdauer der Ladeinfrastruktur soll 15 Jahre betragen. Es wird linearer Wertverlust unterstellt und der Restwert am Ende der Betrachtungsdauer entsprechend gutgeschrieben.
 - Als Dieselpreis werden 96 ct/l angenommen. Für das Laden wird entsprechend der Angaben von Bremerhaven Bus ein Strompreis von 15 ct/kWh angesetzt. Ladeverluste bleiben bei der Betrachtung unberücksichtigt. Als H₂-Preis wird der dem regulären Verkaufspreis entsprechende Nettopreis verwendet (7,98 €/kg H₂). Es fallen keine zusätzlichen Leerkilometer für die Fahrt zur Tankstelle an.
 - Da es sich bei der Umstellung der Hafen-Liner Linie um ein vergleichsweise einfaches Projekt ohne eigene Wasserstofftankstelle handelt, werden für Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit lediglich pauschal 10.000 € angesetzt (siehe Kapitel 6.1). Bei einer Wasserstofftankstelle auf dem Betriebshof oder gar der Errichtung eines Elektrolyseurs ist mit deutlich höheren Kosten für Öffentlichkeitsarbeit zu rechnen.
 - Auch die Kosten für Schulungsmaßnahmen werden bei der Umstellung von lediglich drei Bussen als vergleichsweise gering eingeschätzt, da hier nur wenige Mitarbeiter zu schulen sind (siehe Kapitel 6.2). Hier wird ebenfalls ein Pauschalbetrag von 10.000 € zugrunde gelegt.
 - Die Anpassung der Werkstatt und Abstellung (siehe Kapitel 6.3) ist unter Umständen mit erheblichem Aufwand verbunden, insbesondere wenn Umbaumaßnahmen bei Bestandsgebäuden (Dachentlüftung) oder gar ein kompletter Neubau erforderlich sind. Derartige Kosten konnten im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie nicht abgeschätzt werden, und es wurden lediglich pauschal 30.000 € für die grundlegenden Einrichtungen vorgesehen.
 - Die Bestimmung der Umweltkosten erfolgt gemäß der Methodenkonvention 3.0 des Umweltbundesamtes (Matthey & Bünger, 2019). Die Gesamtemissionen werden dazu gleichmäßig über die Nutzungsdauer aufgeteilt und mit dem jeweiligen Kostensatz belegt. Für die Klimakosten wird der aktuelle Diesel- bzw. H₂-Mix von H₂ MOBILITY mit den CO₂-Kosten für 2028 (Mittelwert bei einer Beschaffung in 2022 und 12 Jahren Betriebszeit) über die gesamte Betrachtungsdauer belegt.
 - Der Kalkulationszinsfuß beträgt 4 Prozent.
 - Sämtliche Kostenwerte als auch der Kalkulationszinsfuß werden als konstant vorausgesetzt, Preissteigerungen bleiben daher generell unberücksichtigt.

5.2. Ergebnisse

Wie erläutert, wird zur Ergebnisdarstellung der ermittelte Kapitalwert in die entsprechenden Annuitäten über die Betrachtungsdauer umgerechnet. In Abbildung 5-1 sind für den Hafen-Liner die Annuitäten für die beiden Wasserstoff-Antriebsalternativen der für Dieselbusse gegenübergestellt.

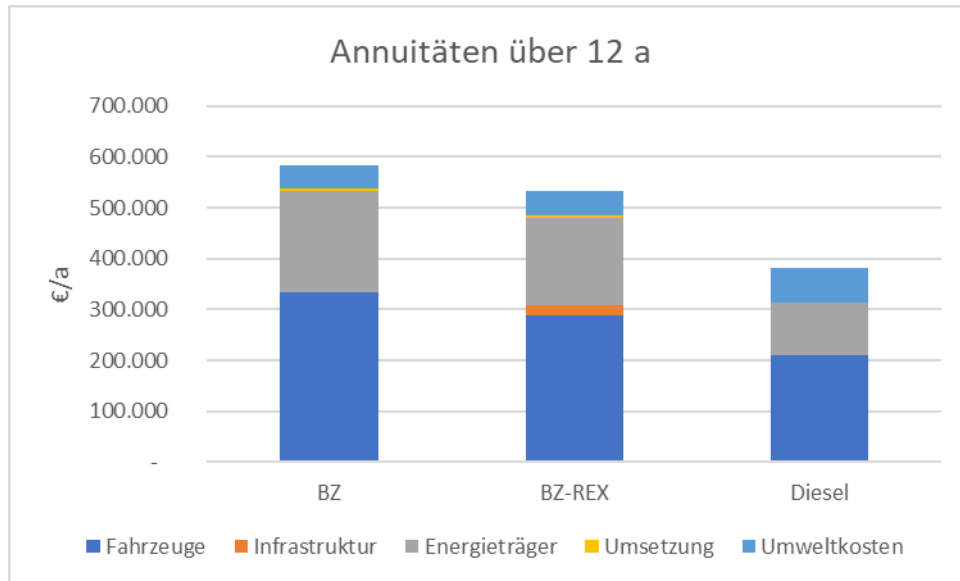


Abbildung 5-1: Vergleich der Annuitäten für die Umstellung der drei Busse des Hafens-Liners

Mit beiden Technologieoptionen sind somit deutliche Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus verbunden, die sich hauptsächlich aus den trotz Förderung höheren Beschaffungs- und Energieträgerkosten ergeben. Folgende weitere Aussagen können abgeleitet werden:

- Die Kosten für den BZ-Hybrid liegen rund 10 % über denen des BZ-REX. Ausschlaggebend hierfür sind die höheren Fahrzeugkosten aufgrund des hier erforderlichen Austauschs der Brennstoffzelle, die die Kosten in die zusätzliche Ladeinfrastruktur beim BZ-REX mehr als aufwiegen.
- Trotz einer angenommenen Förderung von 60 % der Mehrkosten liegen die Beschaffungskosten der Wasserstofffahrzeuge fast 40 % (BZ-REX) bzw. 60 % über denen der Diesel-Gelenkbusse.
- Bei den angenommenen Preisen liegen die Energieträgerkosten für den BZ-REX rund 15 % unter denen des BZ-Hybrid. Von einer Reduktion des H₂-Preises profitiert der BZ-Hybrid gegenüber dem BZ-REX aufgrund des höheren H₂-Verbrauchs. Jedoch erst bei einem H₂-Preis von ca. 4,50 €/kg weisen beide Antriebstypen vergleichbare Energieträgerkosten auf (bei unverändertem Strompreis).
- Es wird deutlich, dass der angenommene Wasserstoffpreis von knapp 8 €/kg H₂ (netto) bei heutigen Dieselpreisen in keiner Weise konkurrenzfähig ist. Für Kostenparität hinsichtlich der Energieträgerkosten müsste der Dieselpreis bei 1,65 €/l und darüber liegen. Die vorgesehene CO₂-Besteuerung wird jedoch auch in der letzten Stufe (mit 55 €/t CO₂) nur zu einer Verteuerung um rund 17 ct/l Diesel führen (FOCUS online, 2019), so dass selbst dann bei Weitem keine Kostenparität gegeben wäre.
- Die Umweltkosten sind deutlich sichtbar und liegen für Dieselbusse um etwa 50 % über denen der Nullemissionsantriebe. Dennoch ist ihr Betrag viel zu gering, um die Ergebnisreihenfolge des Kapitalwertvergleichs zu verändern.

Der getroffene Kostenvergleich ist nur unter den getroffenen Annahmen gültig. Insbesondere ist zu beachten:

- Unter der Annahme, dass auch beim BZ-Hybrid zukünftig kein Komponententausch mehr erforderlich ist, wären die Fahrzeugkosten nahezu vergleichbar.
- Die dargestellten Kosten für die Ladeinfrastruktur erhöhen sich signifikant, wenn ein zusätzlicher Mittelspannungsanschluss erforderlich sein sollte, der hier nicht berücksichtigt wurde.

6. Umsetzung

6.1. Stakeholder Beteiligung

Die Erfahrung aus bereits durchgeführten Projekten zur Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV hat gezeigt, dass das öffentliche Verständnis von Wasserstoff als Kraftstoff unterschiedlich ausgeprägt ist. Aktuelle Projekte in Deutschland (wie z. B. das Projekt der ESWE in Wiesbaden) erleben eine grundsätzliche Zustimmung für die Technologie. Gleichzeitig gibt es verbreitet immer noch Sicherheitsbedenken in der Bevölkerung. Dies gilt insbesondere und in allererster Linie für unmittelbare Anwohner im Falle der Errichtung einer H₂-Tankstelle und ggf. Elektrolyseanlage im Depot. Trotz einer Entfernung des Betriebshof von ca. 200 m zum nächsten Wohngebiet (nördlich angrenzend an die Geeste) ist es daher sinnvoll, Anwohner und Öffentlichkeit mittels gezielter Kampagnen aufzuklären. Oft gibt es hierzu bereits Erfahrungswerte bei den einschlägigen Unternehmen, die die Tankstellen herstellen. Hierbei kann auch das Thema Lärmschutz adressiert werden, bei dem sich die elektrischen Antriebe im Vergleich zum Dieselantrieb als vorteilhaft erweisen. Die zusätzlichen Lärmemissionen der Tankstelle durch den (ggf. auch nächtlichen) Betrieb der Kompressoren können durch geeignete Lärmschutzmaßnahmen minimiert werden.

Die folgenden Formate haben sich bei vergleichbaren Projekten als sinnvoll erwiesen:

- Öffentliche Vorstellung des Konzepts und Darstellung der Erlebbarkeit der Technologie
An einem „Tag der offenen Tür“ oder „BZ-Erlebnistag“ kann die Technologie präsentiert und beispielsweise die Mitfahrt mit einem BZ-Bus angeboten werden, auch in Kombination mit einer Projektvorstellung. Oft hilft das persönliche Erleben den Menschen, einen positiven Bezug zur Technologie aufzubauen (siehe z. B. (Stolzenburg, Whitehouse, & Whitehouse, 2019) und (Hoelzinger & Luedi-Geoffroy, 2013))
- Möglichst frühzeitige und breit angelegte Kommunikation über das Projekt, bspw. auf der Homepage der Stadt Bremerhaven, Flyer, Newsletter etc.

Im Zuges des aktiven gesellschaftlichen Diskurses zur Klimakrise wird seitens der Öffentlichkeit vermehrt die Frage gestellt, inwiefern neue Technologien zur Lösung der Klimakrise beitragen können. Bei Wasserstoffbussen bezieht sich dies im Wesentlichen auf die Herkunft bzw. den Produktionsprozess von Wasserstoff. Hier können – sofern es bei dem in dieser Studie angenommenen Produktionsprozess von Wasserstoff bleibt – auf die in Kapitel 4.2 dargestellte Reduktion der Treibhausgasemissionen eingegangen und die sich daraus ergebenden Vorteile kommuniziert werden.

Neben den Anwohnern und der Öffentlichkeit bzw. den Bürgern der Stadt sind auch die Belange der Mitarbeiter von Bremerhaven Bus zu berücksichtigen. Auch hier bieten sich entsprechende interne Informationskampagnen an. Darüberhinaus sind betroffene Mitarbeiter über entsprechende Schulungen dezidiert auf die neue Technologie vorzubereiten (siehe Kapitel 6.2).

Weiterhin sind für die Umsetzung natürlich die teilnehmenden Projektpartner, wie Bremerhaven Bus selbst, die Versorgungsunternehmen, Fahrzeug- und Tankstellenhersteller sowie die politischen Entscheidungsträger und Genehmigungsbehörden relevant. In Bezug auf die H₂-Versorgung ist zudem auf die frühzeitige Einbindung potentieller H₂-Lieferanten (bspw. im Rahmen der diskutierten H₂-Erzeugungsprojekte, siehe Kapitel 3.3) zu achten. Im weiteren Genehmigungsverlauf kann sich zudem die Beteiligung weiterer Fachbehörden als sinnvoll erweisen, ebenso der Notfallkräfte, insbesondere der Feuerwehr.

Eine Besonderheit der Hafen-Liner-Linie ist ihre touristische Relevanz. Im Rahmen des DESTI-SMART Projekts setzt sich Bremerhaven als eine von neun europäischen Städten mit nachhaltiger Mobilität im Rahmen von Tourismus auseinander. Der Einsatz von Wasserstoffbussen für den Hafen-Liner stellt einen aktiven Beitrag zur Förderung von nachhaltigem Tourismus dar und zeigt das Bestreben der Stadt Bremerhaven bzw. der Erlebnis Bremerhaven GmbH, hier eine Vorreiterrolle zu übernehmen. Dies kann aktiv in der Außendarstellung verwendet werden und damit die touristische Attraktivität der Stadt erhöhen.

Für tiefgehendere Informationen zum Konzept der Stakeholderbeteiligung bei der Umsetzung von Wasserstoffbusprojekten sei auf (Reuter, Faltenbacher, Schuller, Whitehouse, & Whitehouse, 2017) verwiesen. Die NOW-Broschüre „Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV“ (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018) behandelt zudem die Themen „Gesellschaftliche Akzeptanz“ und „Planung und Genehmigung der Infrastruktur“.

6.2. Qualifikationsbedarf

Die Qualifikation der betroffenen Mitarbeiter ist von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche Einführung der Technologie. Über entsprechende Schulungen können die Mitarbeiter/innen mit der Technik vertraut gemacht und auf den Wandel hin zu einem emissionsfreien ÖPNV vorbereitet werden. Dazu gehören neben den Fahrern auch das Versorgungs- und Werkstattpersonal sowie die weiteren Mitarbeiter des Depots.

Grundsätzlich empfiehlt es sich aufgrund der Besonderheiten des elektrischen Antriebs (insbesondere energieeffizientes Fahren durch sinnvollen Einsatz der Rekuperation), jeden Fahrer/jede Fahrerin im Rahmen eines Fahrtrainings auf den Betrieb mit Wasserstofffahrzeugen vorzubereiten. Die Besonderheiten des Antriebs sind jedoch nur ein Teilaspekt der Einweisung, die auch sämtliche anderen fahrzeugspezifischen Aspekte, wie z. B. Lage und Funktion der Bedienelemente, beinhaltet.

Die Werkstattmitarbeiter, die an den Hochvolt-Komponenten arbeiten, müssen spezifisch und je nach Tätigkeitsgebiet ausgebildet werden. Im Leitfaden „Elektromobilität – Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt-Systemen“ der Reihe VBG-Fachwissen wird auf die verschiedenen Qualifikationsprofile abhängig von der jeweiligen Tätigkeit eingegangen (siehe Abbildung 6-1). Für die konkreten Qualifikationsinhalte sei auf (DGUV, 2012) und (VBG, 2016) verwiesen. Weiterhin bieten sich spezielle Ausbildungen zu den elektrischen Klimaanlage (Wärmepumpen) an, da sich diese von klassischen Klimaanlage in Dieselfahrzeugen signifikant unterscheiden.

Mitarbeiter mit Wartungsaufgaben an Wasserstofffahrzeugen sollten neben der allgemeinen Einführung zu Wasserstoff umfangreiche Schulungen zum Thema Brennstoffzelle sowie die Gasanlagenprüfung (GAP) erhalten. Für weitere Informationen hinsichtlich Schulungsinhalten sei hier auf (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018) bzw. auf die BGI5108 „Wasserstoffsicherheit in Werkstätten“ verwiesen. Anbieter einschlägiger Weiterbildungen sind unter anderem die TÜV SÜD Akademie¹¹, die TAK Akademie Deutsches Kraftfahrzeuggewerbe¹², das Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm (WBZU)¹³, und die Industrie- und Handelskammern.¹⁴

¹¹ <https://www.tuvsud.com/de-de/store/akademie/seminare-technik/elektromobilitaet-hochvolttechnik/batterie-wasserstoff>

¹² <https://www.hv-fahrzeuge.de/>

¹³ <http://www.wbzu.de/>

¹⁴ <https://bit.ly/2V8QbTT>

		Stufe 3	zum Beispiel
		Arbeiten unter Spannung am HV-System und Arbeiten in der Nähe berührbarer unter Spannung stehender Teile	– Fehlersuche – Bauteile unter Spannung wechseln
		Stufe 2	zum Beispiel
		– Spannungsfreiheit herstellen – Elektrotechnische Arbeiten im spannungsfreien Zustand	– Freischalten – Gegen Wiedereinschalten sichern – Spannungsfreiheit feststellen – Tausch von HV-Komponenten – Stecker ziehen + Komponententausch (z. B. DC/DC-Wandler, elektrische Klimaanlage)
		Stufe 1	zum Beispiel
		Nichtelektrotechnische Arbeiten	– Testfahrer, – Karosseriearbeiten, – Öl-, Radwechsel

Abbildung 6-1: Qualifizierungsstufen für Tätigkeiten an HV-Fahrzeugen (DGUV-Information 200-005, 2012 (BGHM - Berufsgenossenschaft Holz und Metall, 2012); derzeit in Überarbeitung)

Im Rahmen der Arbeitsgruppe „Innovative Antriebe Bus“ wurden die Schulungsumfänge verschiedener Verkehrsbetriebe aufgenommen, jedoch mit Bezug zu batterieelektrischen Fahrzeugen. Für nähere Informationen sei hier auf die entsprechende Publikation verwiesen (Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus, 2016).

Für die Mitarbeiter der Bremerhaven Bus lassen sich grundsätzlich die folgenden Qualifikationsmodule festhalten:

- Werkstattmitarbeiter (abhängig vom gewünschtem Wartungsumfang durch den Hersteller und dem vorhandenen Qualifikationsniveau)
 - Ausbildung in den Stufen 1 – 3 (Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten, Abbildung 6-1)
 - Schulungen zum Thema Brennstoffzelle sowie mindestens die Gasanlagenprüfung (GAP) mit einer Zusatzausbildung für Wasserstoff
 - Schulung zum Umgang mit der Tankanlage in Zusammenarbeit mit dem Hersteller
- Fahrer
 - Sensibilisierung zum Thema Wasserstoff
 - Einführung zum elektrischen Antrieb
 - Fahrtraining

6.3. Anpassungen Werkstatt und Abstellung

Bei der Umstellung auf bzw. Einführung von Wasserstofffahrzeugen, sind bestimmte Anpassungen an die vorhandenen Einrichtungen notwendig. In der Werkstatt muss aufgrund der Hochvoltkomponenten der Fahrzeuge die Möglichkeit bestehen, diese spannungsfrei zu schalten. Sofern bisher bereits Busse mit HV-Komponenten (z. B. Dieselhybrid) zum Einsatz kommen, sollte diese Möglichkeit schon gegeben sein. Weiterhin sind ein Dacharbeitsstand und Deckenkran hilfreich, da bei Wasserstoffbussen bspw. die Tanks

oder auch die HV-Batterie auf dem Dach angebracht sind und deren Zugänglichkeit für Wartungsarbeiten gewährleistet sein muss.

Neben den Anpassungen aufgrund der technischen Besonderheit der Wasserstofffahrzeuge sind Anpassungen notwendig, die sich auf die physikalischen Eigenschaften des Wasserstoffs zurückführen lassen. In geschlossenen Gebäuden (z. B. Werkstatt, ggf. auch Abstellung) ist über entsprechende Einrichtungen dafür zu sorgen, dass kein explosionsfähiges Gemisch beim Austritt von Wasserstoff entstehen kann. Hierzu gehören u. a. entsprechende Lüftungseinrichtungen in Kombination mit Gaswarnanlagen (H₂-Sensoren) sowie ATEX-Einrichtungen. Detailliertere Informationen können dem VdTÜV Merkblatt 514 entnommen werden. Eine gutachterliche Begehung liefert Klarheit, was im Einzelfall konkret zu tun ist. Für weiterführende Informationen sei auf (BGBahnen, 2009) verwiesen. Die dafür anfallenden Kosten können sehr unterschiedlich ausfallen (unterer fünfstelliger bis in den unteren sechsstelligen Bereich) und sind stark von den lokalen Gegebenheiten wie Gebäudebauform, bereits bestehende Vorrichtungen etc. abhängig (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018). Nach Absprache mit dem Fahrzeughersteller kann für die Fahrzeuge auch über eine Außenabstellung nachgedacht werden, so dass die notwendigen Sicherheitseinrichtungen lediglich für die Werkstatt erforderlich wären.

Alternativ zur Werkstattwartung kann ein Vollwartungsvertrag vorgesehen werden, so dass sämtliche Wartungsarbeiten einschließlich eines ggf. erforderlichen Komponententauschs in der Verantwortung des Herstellers liegen. Dies stellt eine prinzipiell für den Betreiber sehr einfache Lösung dar. Die Kosten hierfür werden mit rund 75 ct/km für eine Gelenkbus abgeschätzt. Ein Vollwartungsvertrag für lediglich drei Fahrzeuge kann jedoch den Hersteller vor erhebliche Schwierigkeiten stellen, da dieser für nur wenige Fahrzeuge dennoch einen nahegelegenen, umfassenden und zügigen Kundendienst organisieren muss. Die Erfahrungen aus anderen Projekten deuten darauf hin, dass ein Vollwartungsvertrag für die drei Hafener-Liner-Busse vom Hersteller unter Umständen nicht angeboten wird.

6.4. Ausblick: Gesamtumstellung der Busflotte

Die Umstellung der gesamten Flotte auf wasserstoffbetriebene Fahrzeuge gestaltet sich wesentlich aufwendiger als die Umstellung der Hafener-Liner-Linie. Zum einen ist die Nutzung einer öffentlichen Tankstelle zur Versorgung der Fahrzeuge aus betrieblichen Gründen nicht mehr praktikabel. Zum anderen kann der Busbetrieb bei einer geringen Anzahl an Fahrzeugen die Wartungsarbeiten an den Fahrzeugen eventuell auslagern, sofern der Hersteller dies anbietet, so dass ein großer Know-How-Aufbau nicht zwingend notwendig ist. Bei einer Komplettumstellung ist eine vollständige Auslagerung aus betrieblichen und Kostengründen nicht mehr sinnvoll. Hier bietet sich somit die Installation einer eigenen Tankstelle am Betriebshof und der umfassende Aufbau von internem Fachwissen an.

Im Rahmen des New Bus Fuel Projekts (Reuter, Faltenbacher, Schuller, Whitehouse, & Whitehouse, 2017) hat sich zudem gezeigt, dass die Kosten der Wasserstoffinfrastruktur im Wesentlichen durch die vorgehaltene Kapazität bestimmt sind. Eine stufenweise Erweiterung der Tankstelle bei gleichzeitiger Bündelung der Fahrzeugbeschaffung erweist sich als entscheidender Faktor, um eine unnötige Kapitalbindung zu vermeiden und den Aufbau der Infrastruktur möglichst kostengünstig darzustellen. In der Konsequenz sollte die Beschaffung bei einer Flottenumstellung daher möglichst in größeren Tranchen (z. B. drei Mal 25 Fahrzeuge) erfolgen, womit jeweils ein entsprechender Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur einhergeht.

Sofern BZ-REX-Fahrzeuge eingesetzt werden sollen, ist frühzeitig mit dem lokalen Netzbetreiber zu klären, welche Maßnahmen nötig sind, um die notwendige Ladeleistung vor Ort bereitstellen zu können. Weiterhin ist das Ladekonzept und die benötigte Hardware (Poller, Ladekabel von „oben“, usw.) auszuwählen. Je nach Konzept ergeben sich unterschiedliche Herausforderungen, die zu bewältigen sind (Gebäudesubstanz, Fluchtwege, Platzverfügbarkeit, etc.).

Für weitere Aspekte (Energiebedarf, H₂-Bereitstellung, Platzbedarf) wird auf Kapitel 3 sowie auf die Risiken und Empfehlungen in Kapitel 7 verwiesen.

7. Risiken und Empfehlungen

7.1. Fahrzeugverfügbarkeit

Zum Stand der Berichtslegung ist lediglich ein einziges 18 m-Busmodell mit Wasserstoffantrieb auf dem Markt verfügbar. Hierbei handelt es sich um den Van Hool ExquiCity18 Fuel Cell, der seit Mitte Dezember 2019 in Pau (Frankreich) auf einer speziell eingerichteten Schnellbuslinie eingesetzt wird. Die Busse sind jedoch Einzelexemplare, die nicht kommerziell verfügbar sind. Andere Betreiber haben auf ihre Ausschreibungen von BZ-Gelenkbussen in 2020 folgerichtig keine Angebote erhalten. Es ist nicht zu erwarten, dass sich diese Situation kurzfristig ändern wird. Seitens der Hersteller ergibt sich als Gesamtbild, dass BZ-Gelenkbusse frühestens in 2022 verfügbar sein werden (s. Kapitel 3.1). EvoBus hat die Auslieferung des ersten BZ-REX Gelenkbusses ebenfalls für 2022 angekündigt (Evobus GmbH, kein Datum).

Sofern eine möglichst zügige Einführung von Wasserstoffbussen erfolgen soll, könnte daher in Betracht gezogen werden, zunächst einige Solobusse zu ersetzen. Hier ist die Fahrzeugverfügbarkeit in den letzten Jahren aufgrund großer Förderprojekte deutlich besser geworden, und mehrere Hersteller bieten entsprechende Fahrzeuge an. Selbst bei Solobussen können die Hersteller jedoch ihren Lieferverpflichtungen nicht immer nachkommen (unabhängig von den derzeitigen Einschränkungen aufgrund der Corona-Krise). Die Beschaffungssituation bei BZ-Bussen ist somit insgesamt vergleichsweise schwierig, was bei der Umstellungsplanung bedacht werden sollte.

7.2. H₂-Versorgung

Mit nur wenigen BZ-Bussen ist es zunächst eine einfache und wirtschaftlich sinnvolle Lösung, die bestehende Tankstelleninfrastruktur zu nutzen, sofern es der Betriebsablauf erlaubt. Hinsichtlich der betrieblichen Umsetzung wäre eine Tankstelle in unmittelbarer Nähe zum Depot (diskutierter zweiter Standort einer H₂ MOBILITY-Tankstelle) deutlich vorteilhafter. Der Bedarf der drei Hafen-Liner-Busse erhöht die Auslastung der externen H₂-Tankstelle signifikant, die ansonsten auch noch während der nächsten Jahre für reine Pkw-Tankstellen als gering eingeschätzt wird (Smolinka, et al., 2018). Durch eine langfristige Vereinbarung mit gesicherten Abnahmemengen sollte hier versucht werden, vorteilhafte Bezugskonditionen auszuhandeln.¹⁵

Mit steigender Anzahl von BZ-Bussen wird eine Tankstelle auf dem eigenen Betriebshof zunehmend sinnvoller, um die Betriebsabläufe zu optimieren und zusätzliche Leerfahrten und den damit verbundenen Zeitaufwand zu vermeiden. Mit zunehmender Busanzahl und insbesondere durch den zukünftig erwarteten Einsatz von BZ-Lkw erhöht sich das Risiko, dass die Tankspur durch ein anderes Fahrzeug blockiert sein könnte, was ebenfalls durch eine Betriebshoftankstelle vermieden wird. Die Betriebshoftankstelle wird zudem sinnvollerweise explizit so ausgelegt, dass die Betankung einer Vielzahl von Bussen innerhalb der vergleichsweise kurzen Einrückzeit der Flotte am Abend erfolgen kann (entsprechend hohe Back-to-Back-Kapazität), was bei einer externen Tankstelle unter Umständen so nicht möglich ist.

¹⁵ Da hierzu keine Informationen vorlagen, konnte dies in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt werden.

Mit einem zunehmenden höheren planbaren H₂-Bedarf kann sogar eine eigene Elektrolyseanlage zur Versorgung der Tankstelle sinnvoll sein. Deren Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit wäre im Rahmen einer separaten Umsetzungsstudie zu prüfen. Angesichts hoher Strombezugskosten erweist sich jedoch häufig die Anlieferung von Wasserstoff als die wirtschaftlichere Alternative, insbesondere da auch in diesem Fall durch langfristige Abnahmeverträge günstigere H₂-Preise erzielt werden können.

Sofern eine H₂-Tankstelle betrieben werden soll, sollte diese stufenweise ausgebaut werden, da ansonsten bei zunächst geringer Fahrzeugzahl hohe kapitalintensive Überkapazitäten resultieren. Dies hat Auswirkungen auf die Fahrzeugbeschaffung, die mit dem Tankstellenausbau abzugleichen ist. Wirtschaftlich optimal erweist sich die gebündelte Anschaffung von Fahrzeugen (ggf. in mehreren Tranchen), die an die Kapazitätserweiterung(en) der Tankstelle angepasst wird. Für eine genauere Darstellung wird auf (Reuter, Faltenbacher, Schuller, Whitehouse, & Whitehouse, 2017) verwiesen.

7.3. Kosten

BZ-Fahrzeuge werden auch in absehbarer Zeit noch deutliche Mehrkosten gegenüber Dieselfahrzeugen aufweisen. So können die Kosten für einen BZ-Gelenkbus derzeit mit rund 850.000 € abgeschätzt werden. Auch bei einer deutlichen Kostensenkung im Laufe der nächsten 10 Jahre (entsprechend einer angenommenen Beschaffung in drei Tranchen) wird erwartet, dass diese auch dann noch mindestens rund 75 % über denen von Dieselfahrzeugen liegen (EMCEL, 2018). Die Umstellung der Gesamtflotte von 73 Fahrzeugen verursacht daher rund 25 Mio. € an Mehrkosten (ohne Berücksichtigung möglicher Förderungen).

Für die H₂-Tankstelle für die Gesamtflotte liegen die Kosten je nach Bustechnologie und somit H₂-Bedarf in der Größenordnung von mindestens 3-5 Mio. €. Abhängig von der gewünschten Speicherkapazität (Back-up bei Lieferausfall) und Redundanz (Mehrfachausführung der wesentlichen Komponenten) können diese auch noch deutlich höher ausfallen. Während die BZ-REX geringere Investitionen bei der Tankstelle erfordern, müssen hier zusätzlich rund 3,7 Mio. € für die Ladeinfrastruktur veranschlagt werden. Sofern der Wasserstoff mittels eines eigenen Elektrolyseurs erzeugt werden soll, sind hier nochmals erhebliche Investitionen von mehreren Mio. Euro erforderlich.

Auch der Betrieb der Busse führt bei den angenommenen Verbräuchen selbst mit einem unterstellten Preisnachlass von 10 % und somit H₂-Nettopreis von 7,18 €/kg H₂ zu gut 70 % höheren Kraftstoffkosten, was für die Gesamtflotte bei einer mittleren jährlichen Fahrleistung von 60.000 km/a gut 1,5 Mio. €/a ausmacht

Weitere hier nicht weiter quantifizierte Kosten im Zusammenhang mit der Flottenumstellung entstehen z. B. durch Umbaumaßnahmen an der Werkstatt und der Abstellung, die Stakeholder-Beteiligung, die erforderliche Mitarbeiterqualifikation, sowie den erheblichen internen Kosten für Planung, Projektsteuerung, Ausschreibung, etc. Eine Erweiterung der Betriebshoffläche, die ebenfalls mit signifikanten Kosten verbunden wäre, ist nach derzeitigem Kenntnisstand auch bei einer vollständigen Flottenumstellung nicht erforderlich, da der vorhandene Betriebshof prinzipiell über großflächige Platzreserven für die H₂-Tankstelle verfügt¹⁶.

Die Mehrkosten stellen für den Busbetreiber (bzw. die Kommune) eine erhebliche Herausforderung dar, zu deren Finanzierung er auf eine entsprechende Förderung angewiesen ist. Relevante Förderprogramme müssen somit ausreichend ausgestaltet sein, um insbesondere die hohen Anfangsinvestitionen zu tätigen. Darüber hinaus müssen sie jedoch eine entsprechend lange Laufzeit aufweisen, um auch die Mehrkosten im Betrieb abzufangen. Zudem sollten sie entsprechend weit ausgelegt werden, um möglichst viele Kostenarten abzudecken. Eine Bepreisung von CO₂ z. B. durch in Form einer CO₂-Steuer würde die Kosten Nachteile einer Flottenumstellung verringern, so dass die Förderung geringer ausfallen könnte.

¹⁶ Für eine genauere Betrachtung ist eine konkrete Tankstellenauslegung unter Berücksichtigung von Fahrwegen, Sicherheitsabständen, ggf. Lärmschutzmaßnahmen etc. erforderlich.

7.4. Zeitverzögerungen und technische Probleme

Es zeigt sich, dass die Einführung von BZ-Bussen für die meisten Betreiber eine komplexe Herausforderung darstellt. Dies beginnt bei der Fahrzeugverfügbarkeit und der Monopolsituation einiger weniger Hersteller, so dass bei Bestellung und Auslieferung mit erheblichen Verzögerungen von bis zu einem Jahr zu rechnen ist.

Wenn die Umstellung größerer Teile der Busflotte auf Wasserstoff und dementsprechend eine eigene H₂-Tankstelle auf dem Betriebshof geplant werden, muss neben der Busbeschaffung der Aufbau der H₂-Infrastruktur geplant werden, was für den Busbetreiber Neuland darstellt. Insbesondere wenn nicht nur eine reine Tankstelle, sondern eine eigene Elektrolyseanlage errichtet werden soll, erfordert dies eine sorgfältige und langfristige Planung, die parallel zur Busbeschaffung erfolgen und mit dieser abgestimmt werden muss.

Sowohl die BZ-Busse als auch die H₂-Infrastruktur sind derzeit noch keine vollständig etablierten Technologien, so dass mit z. T. erheblichen Anlaufschwierigkeiten und einer zumindest zu Beginn verringerten Verfügbarkeit gerechnet werden muss. Auch treten immer wieder Probleme an der Schnittstelle der beiden Systeme auf, da bislang kein anerkannter Betankungsstandard für Nutzfahrzeuge existiert. Aktuell herrscht z. B. große Unsicherheit, inwiefern die neuen Typ-4 H₂-Tanks eine Vorkühlung des Wasserstoffs erfordern, was bei den meisten Bus-Tankstellen (350 bar) bislang nicht vorgesehen ist. Die Vorkühlung wiederum verursacht bei den Pkw-Tankstellen überdurchschnittlich hohe Ausfallzeiten.

7.5. Stakeholder-Beteiligung

Die Umstellung einer Busflotte auf BZ-Fahrzeuge ist ein langwieriges und komplexes Vorhaben. Für eine möglichst reibungslose Umsetzung sollte daher eine frühzeitige Einbindung aller relevanten Projektpartner und Entscheidungsträger erfolgen. Weiterhin sollten insbesondere die Anwohner des Betriebshofs, aber auch die breite Öffentlichkeit, mit der neuen Technologie und den erforderlichen Maßnahmen vertraut gemacht werden, um hier mögliche Bedenken und Widerstände im gemeinsamen Diskurs im Vorfeld zu überwinden.

Auch eine umfassende interne Kommunikation wird angeraten, da von der Umstellung über kurz oder lang alle unmittelbar in den Busbetrieb involvierten Mitarbeiter und Betriebsabläufe betroffen sind (Fahrer, Werkstatt, Disposition etc.).

7.6. Mitarbeiterqualifikation

Für die notwendige Schulung der Mitarbeiter aber auch für die erforderliche Anpassung von Betriebsabläufen muss ausreichend Zeit und Budget einkalkuliert werden, was im laufenden Betrieb zu berücksichtigen ist. Damit bei Auslieferung der Busse entsprechend geschulte Mitarbeiter verfügbar sind, benötigen die Ermittlung des Qualifikationsbedarfs und die Durchführung der Schulungen einen entsprechenden Vorlauf. Zur Erreichung des maximalen Ausbildungsstands entsprechend der Qualifikation eines vollausgebildeten Technikers beim Hersteller sind im laufenden Betrieb rund zwei Jahre einzuplanen. Der konkrete Schulungsplan ist abhängig von der Zahl der Mitarbeiter sowie den notwendigen und bereits vorhandenen Qualifikationen.

7.7. Werkstatt und Abstellung

Bei nur wenigen Bussen bieten sich prinzipiell Vollwartungsverträge an, so dass die Verantwortung für die Einsatzbereitschaft der Busse komplett an den Hersteller delegiert wird. Sofern auch keine geeignete

Werkstatt eingerichtet werden soll, geht dies angesichts der notwendigen Überführungsfahrten für Wartung und Reparatur wiederum zu Lasten der Verfügbarkeit. Zudem ist dieser Service mit einem erheblichen Aufschlag bei den Anschaffungskosten oder hohen Kilometerpauschalen verbunden und für größere Fahrzeugzahlen im Allgemeinen unrentabel. Für zu geringe Stückzahlen ergibt sich wiederum eine teilweise geringe Bereitschaft der Hersteller für einen Vollwartungsvertrag (siehe Kapitel 6.3).

Hier muss in unter Berücksichtigung der vom Hersteller angebotenen Konditionen abgewogen werden, welche Lösung sich für die zunächst drei Busse, aber auch im Hinblick auf eine weitere Flottenumstellung, als organisatorisch und ökonomisch am sinnvollsten darstellt.

7.8. Einbindung in weitere regionale Wasserstoffkonzepte

Um das Hafen-Liner-Projekt mit der Umstellung auf H₂-Antrieb optimal in die Wasserstofflandschaft zu integrieren, kann es sinnvoll sein, eine Vernetzung mit anderen regionalen Wasserstoffprojekten (z. B. die Region Brake oder der Landkreis Osterholz, die ebenfalls im Rahmen des Hyland-Programms gefördert werden) zu etablieren. Dies kann beispielsweise in einer gemeinsamen Fahrzeugbeschaffung resultieren.

Der Kontakt mit weiteren Busbetreibern, die ebenfalls die Einführung von BZ-Bussen planen oder diese bereits einsetzen, ermöglicht zudem einen Erfahrungsaustausch, der z. B. in den JIVE-Projekten auf großes Interesse stößt und sich als sehr hilfreich erwiesen hat. Hier können sich die Betreiber gegenseitig informieren und mit ihren Erfahrungen in den verschiedenen Phasen der Projektumsetzung wie auch beim Betrieb der Busse unterstützen.¹⁷

Auch bei der Wasserstoffversorgung ist eine enge Zusammenarbeit mit weiteren regionalen Wasserstoffprojekten anzustreben. Hierzu gehört, neben den angekündigten Wasserstoffherzeugungsanlagen des Fraunhofer IWES in Bremerhaven am Flugfeld Lune, auch das Projekt einer Wasserstoffherstellung am Standort Mittelsbüren (Bremen) ab 2021.

7.9. Projektablauf

Für die Einführung von Wasserstoffbussen auf dem Hafen-Liner sind somit zahlreiche Punkte zu beachten, die nachfolgend nochmals zusammengefasst sind. Die dargestellte Reihenfolge beschreibt den vorgeschlagenen zeitlichen Ablauf, auch wenn die einzelnen Umsetzungsschritte miteinander verzahnt sind und häufig ineinander übergehen. So sollten z. B. bereits in die Grobplanung Überlegungen einfließen, ob und wie eine Werkstatthanpassung erforderlich ist. Die detaillierte Planung und Ausführung kann jedoch zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen, da von einer Projektdauer (Zeit bis zur Aufnahme des Linienbetriebs) von mindestens zwei Jahren auszugehen ist, innerhalb derer die Werkstatthanpassung flexibel vorgenommen werden kann.

¹⁷ Eine überregionale Plattform bietet die Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus (AG Bus), in der sich Busbetreiber, Politik und Kommunen halbjährlich zu Themen wie Beschaffung, Fahrzeugverfügbarkeit und Energieverbrauch etc. austauschen.

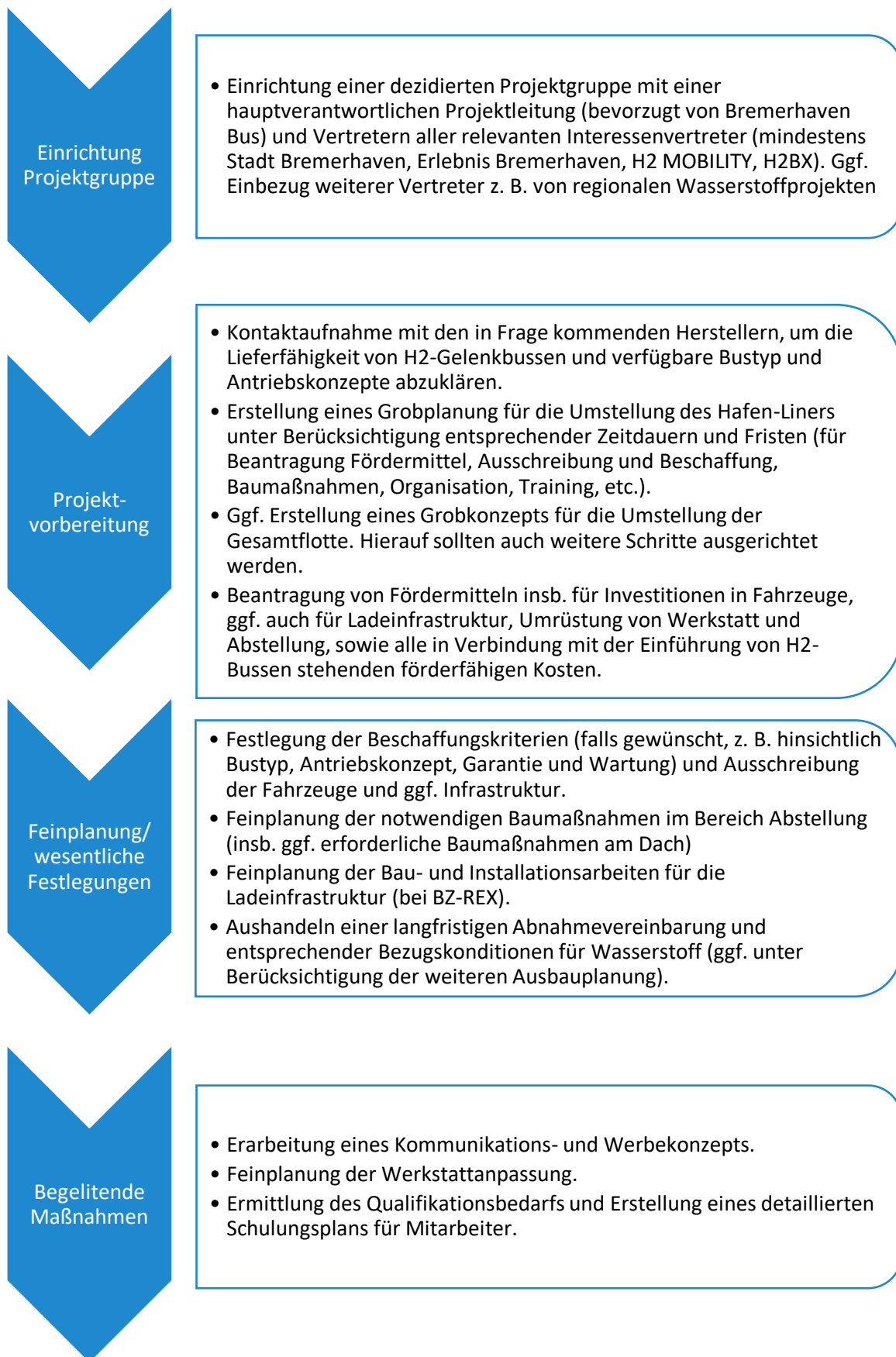


Abbildung 7-1: Projektablauf zur Einführung von Wasserstoffbussen

Literaturverzeichnis

- Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus. (2016). *Statusbericht 2015/16 - Hybrid- und Elektrobustprojekte in Deutschland*.
- Ballard. (2019, Juni 09). *Ballard Unveils 8th Generation Zero-Emission Fuel Cell Module for Heavy Duty Motive Market*. Retrieved from <https://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2019/06/10/ballard-unveils-8th-generation-zero-emission-fuel-cell-module-for-heavy-duty-motive-market>
- Barth, F. (2019). Session 3.3 Key lessons from the pilot. In *CertifHy 2 Final Stakeholder Conference and Plenary*. Brüssel.
- BGBahnen. (2009). *BGI 5108 - Wasserstoffsicherheit in Werkstätten*.
- BGHM - Berufsgenossenschaft Holz und Metall. (2012). *DGUV Information 200-005: Qualifizierung von Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen*.
- BMWi. (2020). *Die Nationale Wasserstoffstrategie*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- Bremerhaven Green Economy. (2020, Mai 25). *Bremerhaven Green Economy*. Retrieved from <https://green-economy-bremerhaven.de/2019/11/eine-tonne-gruener-wasserstoff-pro-tag/>
- C40 Cities. (2018). *Fossil Fuel Free Streets Declaration*. Retrieved 10 02, 2018, from www.c40.org/other/fossil-fuel-free-streets-declaration
- dena. (2018). *Heutige Einsatzgebiete für PowerFuels - Factsheets zur Anwendung von klimafreundlich erzeugten synthetischen Energieträgern*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).
- DGUV. (2012). *Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen - BGI/GUV-I 8686*. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung.
- EMCEL. (2018, 05 16). *Wie entwickeln sich die Preise für Brennstoffzellenbusse?* Retrieved from <https://emcel.com/de/preise-fuer-brennstoffzellenbusse/>
- Evobus GmbH. (n.d.). *Hightech-Stadtbus für SWEG Lahr*. Retrieved from <https://www.evobus.com/de-de/layer/hightech-stadtbus-fuer-sweg-lahr/>
- EY, LBST, BBH, TÜV Süd. (2016). *Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene*. NOW.
- FOCUS online. (2019, 12 28). *Benzinpreis-Schock, höhere Kfz-Steuer: Jetzt droht die "Staffelmieterhöhung" für Autofahrer*. Retrieved from https://www.focus.de/auto/ratgeber/kosten/koalition-einigt-sich-auf-steuererhoehungen-benzinpreis-schock-und-hoehere-kfz-steuer-wie-teuer-wird-autofahren-in-deutschland_id_11463752.html
- H2MOBILITY. (2020, Mai 15). *Hydrogen cars*. Retrieved from *All models at a glance:* <https://h2.live/en/wasserstoffautos>
- Hoelzinger, N., & Luedi-Geoffroy, N. (2013). *CHIC Grant agreement No: 256848 Deliverable No. 3.5 Report on results of interviews and analyses*.
- INFRAS. (2019). *HBEFA - Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 4.1*.
- Ingaver. (2020). *Präsentation: "grüner" Wasserstoff aus Bremen - Partnertreffen "Hyways for Future" 18.02.2020*.

- Kupferschmid, S., & Faltenbacher, M. (2018). *Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV - Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte*. NOW GmbH.
- Matthey, A., & Bünger, B. (2019). *Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze (Stand 02/2019)*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA).
- Reuter, B., Faltenbacher, M., Schuller, O., Whitehouse, N., & Whitehouse, S. (2017). *New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots - Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling*.
- Riepe, S. (2020, Mai 15). Informationen zur H2-Herkunft der H2Mobility-Tankstellen (Email-Korrespondenz). (S. Kupferschmid, Interviewer)
- Schott, C. (2020, April 29). Experteninterview zur lokalen Situation der Wasserstoffinfrastruktur. (S. K. Stefan Eckert, Interviewer)
- Smolinka, T., Wiebe, N., Sterchele, P., Palzer, A., Lehner, F., Jansen, M., . . . Zimmermann, F. (2018). *Studie IndWEde: Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme*. Berlin: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie - NOW GmbH.
- Stolzenburg, K., Whitehouse, N., & Whitehouse, S. (2019). *JIVE Best Practice and Commercialisation Report 1 D3.23*.
- thinkstep. (2019). *eigene Darstellung*.
- VBG. (2016). *VBG-Fachwissen: "Elektromobilität - Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt-Systemen"*. VBG - Ihre gesetzliche Unfallversicherung.