Einführung von Wasserstoff-bussen im ÖPNV

Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte

NOW-GMBH.DE

IMPRESSUM

AUFTRAGGEBER
NOW GmbH
Fasanenstraße 5
10623 Berlin
+49 (0)30-311 61 16-00
kontakt@now-gmbh.de

REDAKTION
Elena Hof
Programm Managerin NIP
NOW GmbH

Stefan Kupferschmid
Dr. Michael Faltenbacher
thinkstep AG

GESTALTUNG
Peter Frey, Katrin Schek
kursiv Kommunikationsdesign

DRUCK
Sprintout Digitaldruck GmbH

INHALT		SEITE

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 4

2 Fahrzeuge 5

2.1 Antriebskonzepte 5

2.2 Reichweite 8

3 Wasserstoffinfrastruktur 9

3.1 Wasserstoffbedarf 9

3.2 Wasserstoffbereitstellung / Quellen 12

3.3 Wasserstofftankstelle 14

3.4 Elektrolyse 17

3.5 Flächenbedarf 18

3.6 Netzanschlussleistung 21

3.7 Ausbauplanung 21

3.8 Kosten 24

3.8.1 Investitionsbedarf 24

3.8.2 Betriebskosten 26

4 Betriebliche Aspekte 29

4.1 Betankung 29

4.2 Wartung 31

4.3 Werkstattanpassung 31

4.4 Mitarbeiter/-innen 32

5 Umwelteffekte 33

5.1 Treibhausgasemissionen (THG) 33

5.2 Luftschadstoffe und Lärm 36

6 Weiterführende Informationen 37

6.1 Hersteller 37

6.2 Gesellschaftliche Akzeptanz 40

6.3 Planung und Genehmigung der Infrastruktur 41

6.4 Literatur 44

Literaturverzeichnis 45

Tabellenverzeichnis 45

Abbildungsverzeichnis 46

1 Einleitung

Das vorliegende Dokument wendet sich an Busflottenbetreiber, die in ihrer Flotte Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb einsetzen möchten. Im ÖPNV wird seit Anfang der 2000er-Jahre Wasserstoff in Bussen genutzt und kommt mittlerweile auch in Personenzügen zum Einsatz. Ziel ist es, den Busbetreibern ein Dokument an die Hand zu geben, das die grundlegenden Aspekte der Wasserstofftechnologie im ÖPNV darstellt und erläutert, worauf es bei ihrer Einführung ankommt.

Einleitend werden daher zuerst die verschiedenen Bustechnologien und deren Unterschiede beschrieben, um in einem zweiten Schritt den Fokus auf die notwendige Infrastruktur zu legen. Diese unterscheidet sich im Wesentlichen aufgrund der Eigenschaften von Wasserstoff von einer Dieseltankstelle. Aufgrund der niedrigen volumetrischen Energiedichte im gasförmigen Zustand muss er unter hohem Druck gelagert werden[1]. Abhängig von realen Fahrzeugverbrauchsdaten wird deshalb die technische Ausgestaltung der Tankstelle diskutiert und Aspekte wie Flächenbedarf und die Anbindung an das lokale Stromnetz erläutert. Zudem wird eine erste Einordnung der zu erwartenden Infrastrukturkosten vorgenommen.

1 Eine Bustankstelle arbeitet üblicherweise mit Systemdrücken bis 500 bar, der Speicherdruck im Fahrzeug selbst beträgt 350 bar. Beim Pkw liegt er bei 700 bar.

Nach einer Erläuterung der betrieblichen Aspekte, die es bei der Einführung von Wasserstoffbussen zu beachten gilt, wird der Beitrag, den die Wasserstofftechnologie zum Klimaschutz und zur Reduktion bzw. Vermeidung lokaler Schadstoffemissionen leisten kann, dargestellt. Abschließend wird eine Übersicht aktueller Fahrzeug- und Tankstellenhersteller gegeben und auf die wesentlichen Aspekte hinsichtlich der behördlichen Genehmigung der Infrastruktur eingegangen.

ABBILDUNG 1-1 **Beispiele für Wasserstofftankstellen (Clean Energy Partnership):**
links OMV-Tankstelle am Flughafen Stuttgart mit einem Niederdrucktank (stehender Behälter im Hintergrund)
rechts Shell-Tankstelle in Berlin mit Flüssig-H_2-Trailer (vorne) und Hochdruckbänken (hinten)

2 Fahrzeuge

5 ANTRIEBSKONZEPTE
8 REICHWEITE

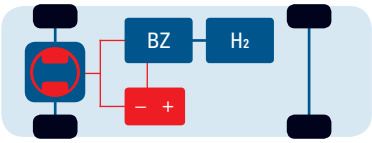
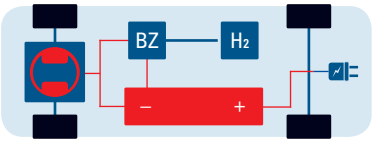
2.1 Antriebskonzepte

Busse, die mit Wasserstoff betrieben werden, verfügen in der Regel über einen elektrischen Antriebsstrang[2]. In einer Brennstoffzelle werden Wasserstoff und Sauerstoff chemisch bei Temperaturen < 70 °C zu Wasser umgewandelt. Mit dem dabei erzeugten Strom werden über eine zwischengeschaltete Batterie die Motoren angetrieben. Es wird weder CO_2 freigesetzt noch entstehen Stickoxid- oder Partikelemissionen. Man spricht von einem lokal emissionsfreien Fahrzeug. Auch der Fahrkomfort ist im Vergleich zu Dieselbussen besser, da der elektrische Antriebsstrang für eine vibrationsarme Fahrt bei geringen Lärmemissionen sorgt.

2 Aktuell wird auch ein Wasserstoffverbrennungsmotor für Busse und schwere Nutzfahrzeuge entwickelt. Eine Erprobung des Motors in einem Fahrzeug steht noch aus (KEYOU, 2018).

Busse mit Brennstoffzellenantrieb können zwischen reinen Brennstoffzellenfahrzeugen (BZ) und batterieelektrischen Fahrzeugen, bei denen zusätzlich eine Brennstoffzelle als Range-Extender zur Verlängerung der Reichweite fungiert (BZ-REX), unterschieden werden. Beiden gemein sind die Hauptkomponenten: Brennstoffzelle, Hochvoltbatterie und Drucktanks für den Wasserstoff. Die Nutzung bzw. das Funktionsprinzip (siehe auch Tabelle 2-1) und die deshalb unterschiedliche Dimensionierung der Hauptkomponenten ist jedoch verschieden.

TABELLE 2-1 **Technologieübersicht**

	BZ	BZ-REX
Prinzipienschema		
	Quelle: Van Hool	Quelle: Solaris
Technologiereife	Serie	Erprobung

Der reine Brennstoffzellenbus besitzt eine relativ kleine Batterie (üblicherweise < 30 kWh), deren Aufgabe es ist, den Strom aus der Brennstoffzelle zwischenzuspeichern und bei Bedarf zusätzlich zur Brennstoffzelle Leistung für den Antriebsstrang bereitzustellen. Weiterhin nimmt sie auch die beim Bremsen durch Rekuperation gewonnene Energie auf. Die Hauptenergiequelle ist der Wasserstoff, der über eine leistungsstarke Brennstoffzelle umgewandelt wird. BZ-REX-Fahrzeuge verfügen üblicherweise über eine deutlich größere Batterie (> 200 kWh, ähnlich der von klassischen Batteriebussen) und einer zusätzlichen, zumeist leistungsmäßig kleiner dimensionierten Brennstoffzelle. Dabei wird zunächst die in der Batterie gespeicherte Energie genutzt. Die Brennstoffzelle sorgt für eine kontinuierliche Nachladung der Batterie während des Betriebs und verlängert so die Reichweite des Fahrzeugs. Tabelle 2-2 zeigt typische Kenndaten eines 12-m-Solobusses zu BZ-Leistung und Tank- bzw. Batteriegröße.

TABELLE 2-2 **Typische Kenndaten BZ- und BZ-REX-Bus**

Solobus 12 m	BZ	BZ-REX
HV-Batterie	30 kWh	250 kWh
H_2-Tank	40 kg H_2	15 kg H_2
Brennstoffzelle	100 kW	30 kW

Hecke, 2018, Van Hool, 2018, thinkstep & Prognos, 2017, Witkowski, 2017

Bei BZ-Gelenkbussen werden üblicherweise etwas größere Batterie- und Tankgrößen verwendet, um dem höheren Energiebedarf Rechnung zu tragen. Beim BZ-REX ist zu erwarten, dass die Batterie in etwa die gleiche Kapazität hat, die Wasserstoffspeicherkapazität dafür aber entsprechend durch zusätzliche H_2-Tanks erweitert wird.

Aufgrund der Unterschiede in der Funktionsweise sind unterschiedliche Infrastrukturkomponenten notwendig: BZ-Fahrzeuge werden ausschließlich mit Wasserstoff betankt. BZ-REX-Fahrzeuge benötigen neben der Wasserstoffinfrastruktur zusätzlich eine Ladeinfrastruktur, um die Batterie wieder aufzuladen. Die Wasserstoffinfrastruktur kann dafür hinsichtlich ihrer Betankungskapazität kleiner dimensioniert werden.

Während der Verbrauch je 100 Kilometer eines reinen Brennstoffzellenfahrzeugs über verschiedene Umlauflängen relativ konstant ist, ergeben sich bei dem BZ-REX-Fahrzeug je nach Umlauflänge und Fahrzeugkonfiguration stark unterschiedliche Verbräuche. Dies liegt am oben erwähnten Funktionsprinzip des BZ-REX: Kurze Umläufe können je nach Energiebedarf rein mit der in der HV-Batterie gespeicherten Energie, d. h. ohne Nutzung der Brennstoffzelle (und damit des Wasserstoffs im Tank) zurückgelegt werden. Mit steigender Umlauflänge wird die benötigte Energie über die Brennstoffzelle zugeführt, wodurch der kilometerbezogene Wasserstoffverbrauch – bei gleichzeitig sinkendem spezifischem Stromverbrauch – ansteigt. Basierend auf typischen Leistungsdaten der Fahrzeuge (vgl. Tabelle 2-2) zeigt Tabelle 2-3 die Verbräuche eines BZ- und eines BZ-REX-Busses für zwei Umläufe mit unterschiedlicher Länge.

TABELLE 2-3 **Beispielhafte Energieverbrauchswerte**

	BZ	BZ-REX
Verbrauch pro 100 km	8,5-10,5 kg H_2	40 – 160 kWh Strom; 0– 6 kg H_2
Verbrauch pro 100 km (125 km Umlauflänge)		135 kWh Strom; 1 kg H_2
Verbrauch pro 100 km (250 km Umlauflänge)		80 kWh Strom; 3,5 kg H_2

2.2 Reichweite

Durch die Nutzung der Rekuperationsenergie beim Bremsen kann der Energieverbrauch des Gesamtfahrzeuges reduziert werden, die Topologie der Strecke ist daher bei elektrisch angetriebenen Stadtbussen generell nicht derart entscheidend, wie sie es bei Dieselbussen ist (Faltenbacher, et al., 2016). Der zusätzliche große Vorteil wasserstoffbetriebener Busse ist im Vergleich zu rein batterieelektrischen Fahrzeugen mit Depotladung ihre Reichweite und die damit verbundene Flexibilität im Betrieb. Die Heizung und vor allem Klimatisierung der Busse haben jedoch entscheidenden Einfluss auf die Reichweite elektrisch angetriebener Fahrzeuge. Je nach Jahreszeit sind die Energieverbräuche der Fahrzeuge entsprechend unterschiedlich. Im Winter haben Busse mit Brennstoffzellen bspw. den Vorteil, dass die Abwärme aus der Brennstoffzelle für die Heizung genutzt werden kann und somit der Energieverbrauch nicht so stark ansteigt wie bei elektrisch beheizten Batteriebussen. Analog zu Dieselbussen sind auch die Einsatzbedingungen bezüglich des Verbrauchs (und damit der Reichweite) entscheidend. Anspruchsvolle, innerstädtische Einsätze (bspw. SORT[3] 1) weisen höhere Verbräuche pro Kilometer und damit eine geringere Reichweite auf als bspw. Umläufe im vorstädtischen Bereich (SORT 3). Genauere Angaben zu typischen Verbräuchen bzw. zur Bestimmung des Wasserstoffbedarfs sind in Kapitel 3 zu finden.

3 SORT: Standardised On-Road Test Cycles

ABBILDUNG 2-1 **Wasserstoffbus der Hamburger Hochbahn beim Tanken an der H_2-Tankstelle Hafencity**

Vattenfall, Foto: Ulrich Mertens, Atelier für Kunst und Fotografie

Grundsätzlich ist die Reichweite der Fahrzeuge neben dem Einsatzkontext auch abhängig von der Größe der Energiespeicher. Die in Tabelle 2-2 gezeigten Konfigurationen ermöglichen Reichweiten je nach Anwendung von bis zu 400 Kilometern – abhängig von den oben genannten Aspekten. Wird beim BZ-REX bspw. eine kleinere Batterie verwendet, muss dies durch zusätzlich mitzuführenden Wasserstoff ausgeglichen werden. Nur dann können vergleichbare Reichweiten erzielt werden. Gegebenenfalls ist in solch einem Fall auch die Leistung der Brennstoffzelle anzupassen, d. h. zu erhöhen.

Eine pauschale Aussage zur Reichweite von Wasserstoffbussen kann aufgrund der vielen Einflussfaktoren nicht seriös getätigt werden. Erfahrungswerte aus vergangenen und aktuellen Projekten zeigen jedoch, dass die große Mehrheit der aktuell zu bedienenden Umläufe problemlos mit den verfügbaren BZ-Buskonzepten bewältigt werden kann.

3 Wasserstoffinfrastruktur

9 WASSERSTOFFBEDARF
12 WASSERSTOFFBEREITSTELLUNG / QUELLEN
14 WASSERSTOFFTANKSTELLE
17 ELEKTROLYSE
18 FLÄCHENBEDARF
21 NETZANSCHLUSSLEISTUNG
21 AUSBAUPLANUNG
24 KOSTEN
24 INVESTITIONSBEDARF
26 BETRIEBSKOSTEN

3.1 Wasserstoffbedarf

Ausschlaggebend für die Dimensionierung der Wasserstoff- und gegebenenfalls Ladeinfrastruktur, ist der tägliche Energiebedarf der umzustellenden Flotte. Wie bereits in Kapitel 2.2 kurz angerissen, ist dieser von verschiedenen Faktoren abhängig. Um eine erste Abschätzung des Energiebedarfs tätigen zu können, kann man sich auf die folgenden wesentlichen Aspekte konzentrieren:

1. **Fahrzeugtyp:** Wird ein rein wasserstoffbetriebenes Fahrzeug oder ein batterieelektrisches mit Brennstoffzelle als Range-Extender betrachtet?
2. **Fahrzeuggröße:** Die Fahrzeuggröße steht stellvertretend für das Fahrzeuggewicht. Vereinfachend sollen hier lediglich Solo- und Gelenkbusse (12-m- bzw. 18-m-Fahrzeuge) unterschieden werden.
3. **Jahreszeiten:** In Kapitel 2.2 wurde bereits kurz erläutert, welchen Einfluss die Jahreszeit auf den Energieverbrauch der Fahrzeuge hat. Speziell in den Sommermonaten (Kühlung) und Wintermonaten (Heizung) wird dieser höher sein als in der restlichen Zeit des Jahres. Für die spätere Auslegung der Infrastruktur ist immer der Maximalbedarf an Wasserstoff heranzuziehen.
4. **Fahrprofil:** Dieses wird vor allem durch die Haltestellenabstände, die Zahl der erforderlichen Stopps und die Verkehrsdichte charakterisiert, die maßgeblich die durchschnittliche Geschwindigkeit bestimmen. Für eine Verbrauchsabschätzung können die Umläufe anhand ihrer Durchschnittsgeschwindigkeit einem der SORT-Zyklen zugeordnet werden.

5 **Umlaufcharakteristika und Topografie:** Um den Energiebedarf der gesamten Flotte zu bestimmten, ist es wichtig, die spezifischen Eigenheiten der Umläufe in Kombination mit dem Fahrprofil (Punkt oben) zu kennen.

Im Folgenden werden die genannten Punkte genauer erklärt und anhand des Beispiels aus Tabelle 3-1 der Energiebedarf für beide Antriebsvarianten BZ und BZ-REX exemplarisch bestimmt.

TABELLE 3-1 **Fallbeispiel zur Herleitung des Energiebedarfs**

	Solobusse	Gelenkbusse
Anzahl Busse	35	15
Jahreszeit	Sommer	
Mittlere Umlauflänge	250 km	
Umlaufcharakteristik	Für eine erste Herleitung des Wasserstoffbedarfs für die Flotte wollen wir uns auf gemittelte Verbräuche (über die SORT-Zyklen, vgl. Kapitel 2) beschränken. Eine detaillierte Erfassung der Umläufe ist für eine tatsächliche Detailplanung der Infrastruktur aber unerlässlich.	

Fahrzeugtyp

In diesem Fallbeispiel sollen beide Fahrzeugtypen (BZ und BZ-REX) betrachtet werden. Anhand der Verbrauchsdaten aus Tabelle 2-3 ist ersichtlich, dass die verschiedenen Fahrzeugtechnologien unterschiedliche Verbräuche und damit unterschiedlichen Bedarf an Infrastruktur haben.

Fahrzeuggröße

Der Mehrverbrauch zwischen Gelenk- und Solobus ist stark abhängig von der Liniencharakteristik. Als ersten Anhaltswert kann ein Mehrverbrauch von rund 40 Prozent angenommen werden. Beim BZ-REX-Fahrzeug ist zu berücksichtigen, dass der Mehrverbrauch den Strom- und Wasserstoffverbrauch in Summe berücksichtigt. Bei gleicher Batteriegröße (vgl. Kapitel 2) wird der Stromverbrauch konstant bleiben, der Wasserstoffverbrauch nimmt dagegen überproportional zu (ca. Faktor 2 für das gewählte Beispiel mit 250 Kilometer Umlauflänge).

Jahreszeiten

Wie bereits erwähnt, muss für die Auslegung der Infrastruktur der Maximalbedarf herangezogen werden. Dieser ist durch den Zusatzbedarf für die Klimatisierung normalerweise im Sommer am höchsten (–20 Prozent in den Übergangsmonaten im Frühling und Herbst). Im Winter ist ebenfalls mit einem höheren Energiebedarf zu rechnen. Je nach Klimazone liegt dieser etwas niedriger als in den Sommermonaten.

Fahrprofil

Die SORT-Zyklen stellen typische Einsatzkontexte von Bussen dar. SORT 1 ist der anspruchsvolle, innerstädtische Zyklus, bei dem die höchsten Verbrauchswerte je 100 Kilometer zu erwarten sind. SORT 2 bzw. SORT 3 sind weniger anspruchsvoll und haben daher auch geringere Verbräuche. Diese liegen meist zwischen 20 und 30 Prozent unter denen von SORT 1. Auf den Wasserstoffbedarf pro Tag muss das nicht zwangsläufig einen Einfluss haben. Die innerstädtischen Umläufe können den streckenbezogenen Mehrverbrauch bspw. durch die kürzere Fahrstrecke am Tag neutralisieren.

Umlaufcharakteristika und Topgrafie

Die Länge der Umläufe bestimmt in entscheidendem Maß, wie viel Wasserstoff insgesamt benötigt wird. Die Topografie wird hier der Vollständigkeit halber erwähnt. Erste Erfahrungen aus der Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus deuten jedoch darauf hin, dass dieser Einfluss aufgrund der Energierückgewinnung durch Rekuperation bei elektrisch angetriebenen Bussen eher geringer ist (vgl. Kapitel 2.2 und (Faltenbacher, 2016)).

Anhand der Angaben aus Tabelle 3-1 (Anzahl Busse und mittlere Umlauflänge) und Tabelle 2-3 (Verbrauchsdaten) kann somit der Energiebedarf der Gesamtflotte berechnet werden. In der Regel erfolgen an Werktagen mehr Umläufe als an Wochenenden oder an Sonn- und Feiertagen und der Wasserstoffbedarf ist entsprechend höher. Für die Infrastrukturauslegung ist daher der Bedarf an Werktagen im Sommer (vgl. oben) normalerweise ausschlaggebend.

Tabelle 3-2 zeigt die Ergebnisse der Beispielrechnung. Der Wasserstoffbedarf einer BZ-Flotte ist in diesem Beispiel etwa um den Faktor 2 größer als der einer reinen BZ-REX-Flotte. Gleichzeitig wird für letztere pro Tag ein Ladestrom von 10 MWh benötigt.

TABELLE 3-2 **Energiebedarf der Beispielflotte**

	BZ	BZ-REX	
Anzahl Solobusse	35	35	
Anzahl Gelenkbusse	15	15	
Mittlere Umlauflänge	250 km	250 km	
	H_2	H_2	Strom
Energiebedarf Solobusse (Werte in Klammer: je Bus)	831 kg (24 kg)	306 kg (9 kg)	7 MWh (200 kWh)
Energiebedarf Gelenkbusse (Werte in Klammer: je Bus)	499 kg (33 kg)	263 kg (18 kg)	3 MWh (200 kWh)
Täglicher Gesamtenergiebedarf[4]	1.330 kg	569 kg	10 MWh

4 Die Berechnungen basieren auf einem mittleren Verbrauch von 9,5 kg H2/100 km (BZ) bzw. 80 kWh und 3,5 kg H2/100 km (BZ-REX) (vgl. Tabelle 2 3) unter Berücksichtigung der genannten Faktoren für den Mehrverbrauch bei Gelenkbussen.

Diese Zahlen sollen eine erste Größenordnung liefern, welcher tägliche Energiebedarf erwartet werden kann. Eine indikative Abschätzung des Wasserstoffbedarfs liefert das Berechnungstool, welches auf der Publikationsseite der NOW zum Download zur Verfügung steht (siehe auch Kapitel 6.4).

3.2 Wasserstoffbereitstellung / Quellen

Entscheidet sich der Busbetrieb für den Bau bzw. den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur, so gibt es verschiedenste Möglichkeiten, den Wasserstoff zu beziehen:

- **Wasserstoff aus industrieller Produktion**
  Aktuell wird Wasserstoff hauptsächlich in Raffinieren und der chemischen Industrie erzeugt und genutzt. Circa 90 Prozent des in Deutschland genutzten Wasserstoffs wird aus Kohlenwasserstoffen – meist aus Erdgas – gewonnen. Weitere neun Prozent fallen bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse zur Herstellung von Chlor als Nebenprodukt an.
- **Wasserstoff aus der Elektrolyse von Wasser**
  Wasserstoff kann neben den obigen Verfahren auch über die Elektrolyse von Wasser gewonnen werden. Noch spielt dieses Verfahren mit circa ein Prozent Anteil an der Gesamtproduktion eine eher untergeordnete Rolle (EY, 2016).
  Es ist jedoch ein vielversprechendes Verfahren, Wasserstoff unter Nutzung erneuerbarer Energie CO_2-arm zu produzieren, bspw. durch die Nutzung von Windstrom. Dieses Verfahren eignet sich auch für die dezentrale Herstellung des Wasserstoffs direkt beim Busbetrieb.

Abbildung 3-1 gibt einen ersten Überblick über die Verfügbarkeit von Wasserstoff im Bundesgebiet.

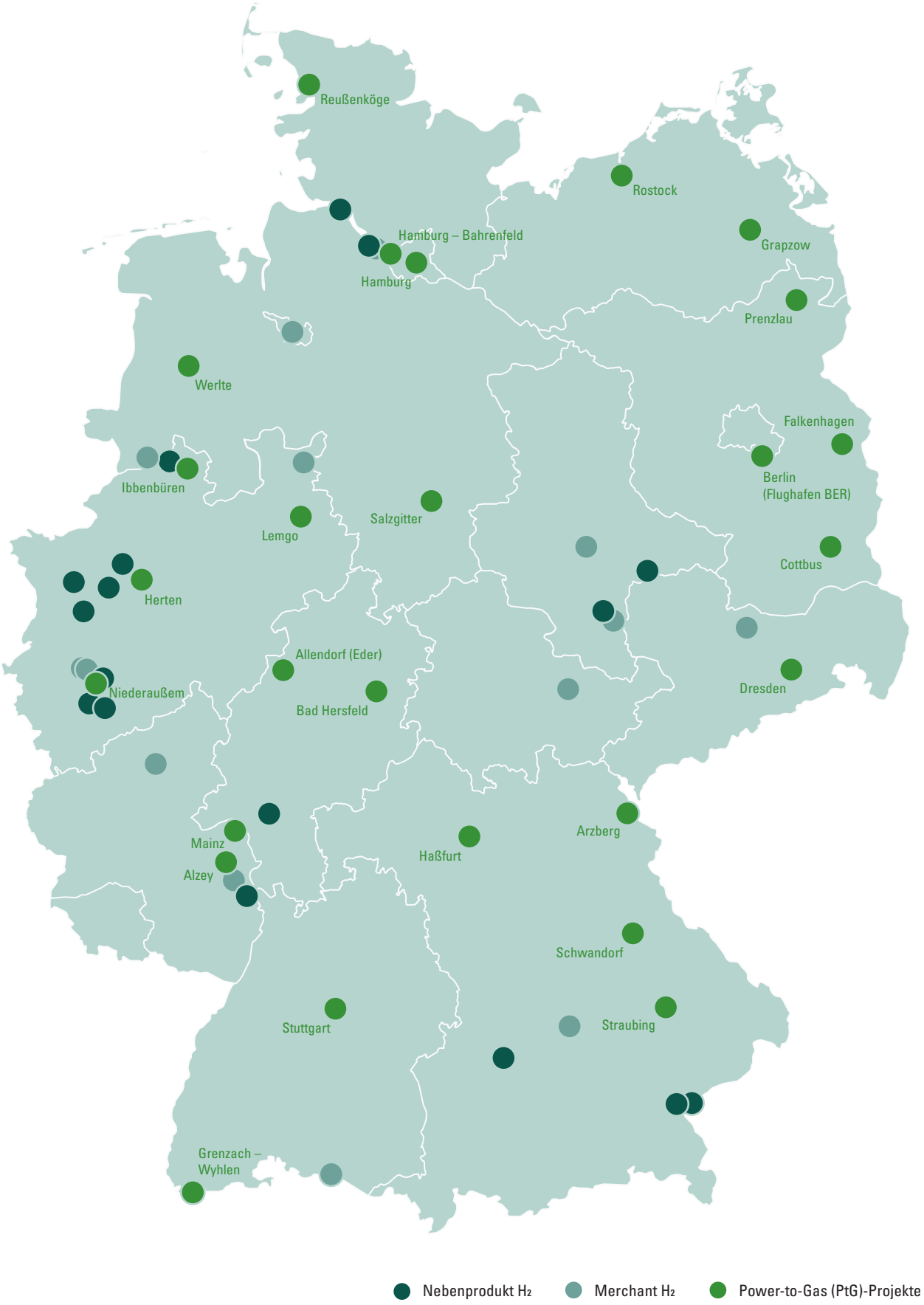


ABBILDUNG 3-1 Wasserstoffbezugsmöglichkeiten in Deutschland (EY, 2016)

Je nach Größe der Busflotte und lokalen Randbedingungen (Nähe zur chemischen Industrie, Nähe zu einem Windpark usw.) kann die Entscheidung entweder für einen Bezug des Wasserstoffs von Dritten oder für die eigene Herstellung ausfallen. Kapitel 3.8 geht auf den Einfluss der unterschiedlichen Wasserstoffquellen auf die Kosten ein, während in Kapitel 5 deren Umweltauswirkungen diskutiert werden. Hier werden zunächst die technischen Aspekte hinsichtlich der Infrastruktur vor Ort beleuchtet.

3.3 Wasserstofftankstelle

Unabhängig davon, ob man sich für den Bezug des Wasserstoffs von Dritten oder für die eigene Herstellung entscheidet, wird eine Tankstelle benötigt. Wie bereits erwähnt, liegt Wasserstoff in aller Regel gasförmig vor. Er wird normalerweise – anders als beim Tankvorgang von flüssigen Kraftstoffen (z. B. Diesel) – nicht in das Fahrzeug gepumpt, sondern strömt aufgrund des Druckunterschiedes zwischen dem Speichertank der Tankstelle und dem Bustank in das Fahrzeug über[5]. Für eine ausführliche Beschreibung des Tankvorgangs sei an dieser Stelle auf Kapitel 4 verwiesen.

5 Es gibt Konzepte, die mit einem sogenannten Booster-Verdichter ausgestattet sind. Hierbei wird der Wasserstoff, welcher bei niedrigem Druck in der Tankstelle vorliegt, durch den Verdichter direkt in den Bustank verdichtet. Es findet somit kein klassisches Überströmen statt.

Abbildung 3-3 zeigt schematisch die verschiedenen Optionen für die Auslegung einer Wasserstofftankstelle aufgeteilt in Produktion / Bereitstellung, Verdichtung und Speicherung und Betankung.

Die Bereitstellung des Wasserstoffs kann über verschiedene Wege erfolgen. Eine Möglichkeit ist die Anlieferung per Pipeline. Diese ist jedoch sehr teuer und nur

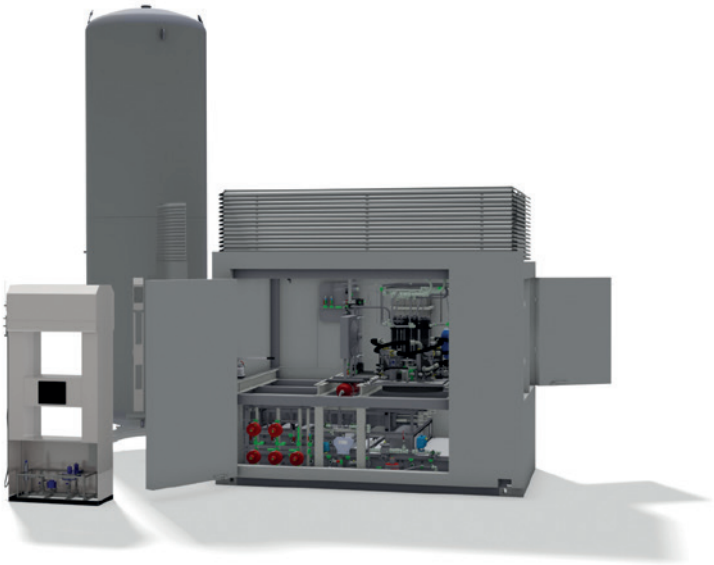


ABBILDUNG 3-2 **Komponenten einer Wasserstofftankstelle: Niederdrucktank (hinten links), ionischer Verdichter eingehaust im Container (rechts) und Zapfsäule (vorne links) (Linde, 2018)**

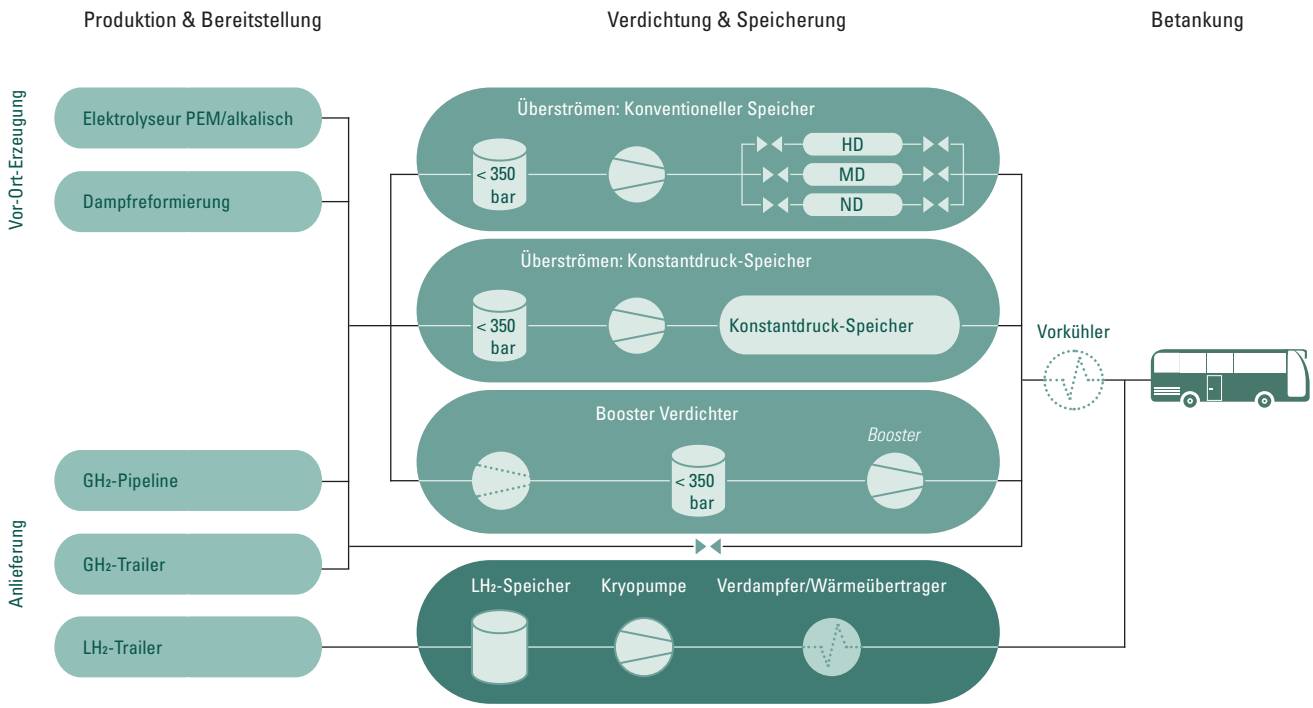


ABBILDUNG 3-3 Funktionsprinzip einer Wasserstofftankstelle (Reuter, et al., 2017)

Erklärung:

Optionale Komponenten

Benötigte Komponenten

GH_2 = gasförmiger Wasserstoff
LH_2 = Flüssigwasserstoff

in den wenigsten Fällen (bspw. unmittelbare Nähe zur wasserstoffproduzierenden Industrie und große Abnahmemengen) sinnvoll bzw. möglich. Die zweite Option ist die eigene Herstellung mittels Elektrolyse oder Dampfreformierung direkt vor Ort, wodurch sich die logistischen Aufwendungen für die H_2-Anlieferung vermeiden lassen. Vorherrschend ist aktuell aber die Anlieferung per Lkw.

Flüssiger Wasserstoff ist dabei eine Option, welche durch zwei Besonderheiten gekennzeichnet ist: Aufgrund seiner hohen volumetrischen Energiedichte kann flüssiger Wasserstoff platzsparend gespeichert werden. Dies ermöglicht den Transport von großen Mengen Wasserstoff bereits mit einer Lkw-Ladung. Gleichzeitig muss aber ca. ein Drittel der im Wasserstoff gespeicherten Energie zur Verflüssigung aufgewendet werden, was die Kosten erhöht. Daher lohnt sich dieses Verfahren eher für größere Busflotten (z. B. > 50 Busse), bei denen der Vorteil der geringeren Logistikaufwendungen wirklich zum Tragen kommt und gegebenenfalls den erhöhten Energiebedarf (und damit den Preis) kompensieren kann.

Die Anlieferung von gasförmigem Wasserstoff ist aktuell die am weitesten verbreitete Methode. Dabei wird dieser typischerweise mit Trailern angeliefert, die ein Druckniveau von 200 – 350 bar haben und zwischen 400 und 600 Kilogramm Wasserstoff fassen. Der Trailer wird bei der Anlieferung mit der Tankstelle verbunden und der Wasserstoff entnommen. Dies kann entweder durch Überströmen in einen Niederdrucktank (ca. 30 bar) erfolgen oder durch direkte Verdichtung in den Hochdrucktank (ca. 500 bar). Die Hochdrucktanks sind normalerweise in mehrere Speicherbänke unterteilt, um eine möglichst vollständige Ausnutzung des Speichervolumens zu gewährleisten. Es gibt auch erste Konzepte mit 500-bar-Trailern, die

direkt in das Speicherkonzept der Tankstelle mit integriert werden können. Dadurch reduziert sich der Aufwand für die Verdichtung an der Tankstelle deutlich. Die Größe der Speicher und die Leistungsfähigkeit der Verdichter richten sich primär nach der Größe der Busflotte und der gewünschten Versorgungssicherheit / Autonomie. Im Rahmen verschiedener Projekte hat sich eine Zwei-Tages-Bevorratung als guter Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit erwiesen.

6 Die „Back-to-back-Kapazität" beschreibt die Anzahl an Bussen, die direkt hintereinander betankt werden können. Anders als bei einer Dieselbetankung ist der Füllstand des Speichertanks (und somit dessen Druck) entscheidend für die Geschwindigkeit, mit der betankt werden kann, und somit schlussendlich auch für die Zeit, die für eine gewisse Anzahl an Bussen benötigt wird.

Die Verdichter sind das Herzstück der Anlage. Sie sorgen dafür, dass ausreichend Wasserstoff bei 500 bar zur Verfügung steht, um die notwendige „Back-to-back[6] -Betankungskapazität" gewährleisten zu können. Aufgrund der benötigten hohen Verfügbarkeit der Wasserstoffinfrastruktur für die zuverlässige Betankung der Busflotte werden sie in aller Regel mindestens einfach redundant ausgeführt. Der eigentliche Tankvorgang erfolgt ähnlich wie beim Dieselbus über eine Tankkupplung (Abbildung 3-4). Für eine detailliertere Erläuterung des Tankvorgangs sei auf Kapitel 4.1 verwiesen.

ABBILDUNG 3-4 Tankvorgang eines Wasserstoffbusses (RVK)

Ist es geplant, dass die Wasserstoffabgabe auch an Dritte erfolgen soll, so ist eine eichfähige Messeinrichtung für die abgegebene H_2-Menge vorzusehen.

Bauliche Anforderungen

Beim Bau einer Wasserstofftankstelle sind aus Sicherheitsgründen zum Teil verschiedene bauliche Besonderheiten zu beachten: Wasserstoffführende Teile wie Speicher und Verdichter sind vor mechanischer Beschädigung (bspw. durch Durchgangsverkehr) und Erwärmung (z. B. durch direkte Sonneneinstrahlung) zu schützen. Dafür können verschiedene Maßnahmen wie Poller und Schutzwände implementiert werden.

Sollte aus betrieblichen Gründen eine Aufstellung der Zapfpunkte in der Halle gewünscht sein, kann gegebenenfalls auch eine Einhausung der Tankstelle inklusive entsprechender Belüftungseinrichtung notwendig sein. Grundsätzlich sind dann auch weitere Vorsichtsmaßnahmen zu treffen: Da Wasserstoff in bestimmten Konzentrationen explosiv ist, ist eine Ansammlung von Wasserstoff (bspw. unter der Hallendecke) zu vermeiden. Dies kann entweder über eine entsprechende konstruktive Auslegung des Hallendachs (bei Neubau) geschehen oder über entsprechende Lüftungseinrichtungen nachträglich sichergestellt werden. Des Weiteren sind ATEX[7]-Einrichtungen (z. B. für Beleuchtung) sowie Wasserstoffsensoren vorzusehen, die im Falle einer Wasserstofffreisetzung z. B. Luken im Dach öffnen, aus denen der Wasserstoff entweichen kann. Detailliertere Informationen können dem VdTÜV Merkblatt 514 entnommen werden. Eine Gefährdungsbeurteilung nach Betriebssicherheitsverordnung ist zudem Teil des Genehmigungsverfahrens für Wasserstofftankstellen und liefert weitere Erkenntnisse, was im konkreten Einzelfall zu beachten ist (siehe auch Kapitel 6.3 zu Genehmigungsverfahren).

7 ATmosphères EXplosibles – EU-Richtlinien zum Explosionsschutz

3.4 Elektrolyse

Möchte man Wasserstoff vor Ort selbst herstellen, bieten sich entweder eine Dampfreformierung oder eine eigene Elektrolyseanlage an. Aufgrund der praktischen Relevanz erfolgt hier eine Beschränkung auf die Elektrolyse. Für Informationen zur Dampfreformierung als weitere Möglichkeit sei auf (Reuter, et al., 2017) verwiesen.

Bei der Herstellung via Elektrolyse von Wasser gilt es, vorab die folgenden Fragen zu beantworten:

- **Wie groß ist der tatsächliche Bedarf an Wasserstoff?**
  Elektrolyseure bieten sich aufgrund der relativ hohen Investitionskosten in der Regel erst bei entsprechend höherem Wasserstoffbedarf an.
- **Gibt es die Möglichkeiten zum Bezug von günstigem (erneuerbarem) Strom?**
  Pro Kilogramm Wasserstoff kann man in etwa von einem Stromverbrauch von ca. 53 kWh/kg (Frauenhofer ISE, 2018) für die Elektrolyse und weitere 4 kWh/kg (Reuter, et al., 2017) für die Verdichtung ausgehen. Die Verfügbarkeit von günstigem (Grün-)Strom ist daher entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Vor-Ort-Erzeugung.

Kapitel 3.8.2 geht genauer auf die relevanten Kostenpunkte ein.

Abbildung 3-5 zeigt beispielhaft einen Elektrolyseur. Typischerweise werden die Komponenten für die Wasserstofferzeugung in Containern untergebracht. Dazu gehört neben den eigentlichen Elektrolyse-Stacks ebenfalls eine ggf. vorzusehende Wasseraufbereitung zur Bereitstellung von Wasser mit den geforderten Stoffeigenschaften (meist deionisiertes Wasser, um die notwendige Leitfähigkeit sicherzustellen).

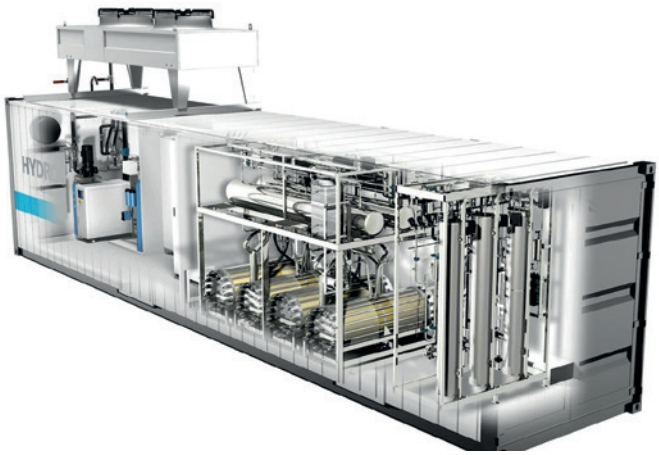


ABBILDUNG 3-5 Beispiel eines Elektrolyseurs (Hydrogenics, 2016)

3.5 Flächenbedarf

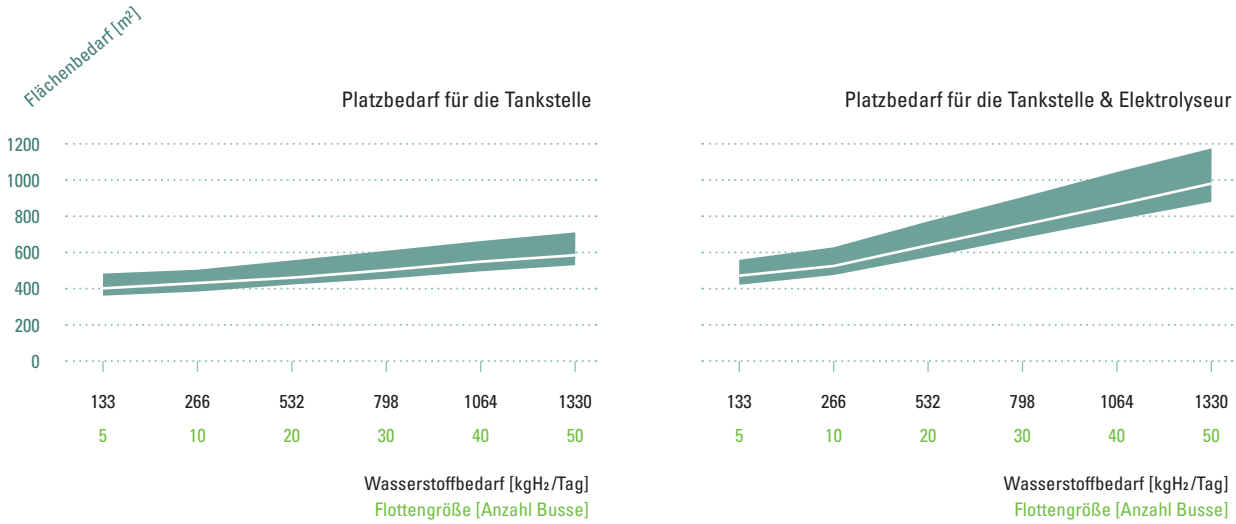
Die oben genannten Komponenten einer Wasserstoffinfrastruktur auf dem Busdepot können aus technischer Sicht sehr flexibel angeordnet werden. Ähnlich dem Elektrolyseur werden viele der Komponenten in Containern aufgestellt, um eine modulare Erweiterung möglich zu machen. Der resultierende Platzbedarf einer H_2-Infrastruktur ergibt sich schlussendlich aus folgenden Einzelkomponenten:

1. Die eigentlichen Tankstellenkomponenten Verdichter, Speicher, Zapfsäule etc.
2. Stellplätze für Trailer
   Bei einem Anlieferkonzept (bzw. als Backup bei eigener H_2-Herstellung) werden normalerweise mindestens zwei[8] Trailerstellplätze (ca. 250 m²) vorgesehen, um eine reibungslose Wasserstoffversorgung zu gewährleisten
3. Sicherheitsabstände je nach Komponenten zwischen 3 – 5 Metern, welche sich durch geeignete Maßnahmen (z. B. Schutzwände, Poller etc.) reduzieren lassen – siehe auch (VdTÜV, 2009)
4. Gegebenenfalls Vor-Ort-Erzeugungsanlage (z. B. Elektrolyseur)

8 Bei Flüssigwasserstoff kann aufgrund der großen Menge an Wasserstoff pro Trailer (> 3.000 kg) auf einen zweiten Stellplatz bspw. verzichtet werden.

Da gewisse Komponenten wie Trailerstellplätze auch bereits für eine kleine Flotte benötigt werden, ergibt sich die in Abbildung 3-6 dargestellte Abhängigkeit des Platzbedarfs von der Flottengröße und des Wasserstoffbedarfs. Kleine Flotten (5 – 10 Busse – bspw. in einer Einführungsphase) benötigen bei gasförmiger Wasserstoffanlieferung ca. 380 – 480 m² Fläche, für eine Busflotte von 50 Bussen (vgl. Beispielflotte aus Tabelle 3-1) ist mit ca. 520 – 650 m² zu rechnen. Kommt ein Elektrolyseur hinzu, ergibt sich ein Platzbedarf von ca. 900 – 1.150 m². Diese Zahlen umfassen die reinen Tankstellenkomponenten ohne Anfahrtswege und Tankspuren für die Busse. Je nach technischer Ausführung, Komponentenaufstellung (z. B. liegende vs. stehende H_2-Speicher) und je nach Anlieferungskonzept können sie entsprechend höher oder niedriger ausfallen.

ABBILDUNG 3-6 **Platzbedarf der Wasserstoffinfrastruktur in Abhängigkeit des täglichen Wasserstoffbedarfs bei gasförmiger Wasserstoffanlieferung (thinkstep, 2018)**



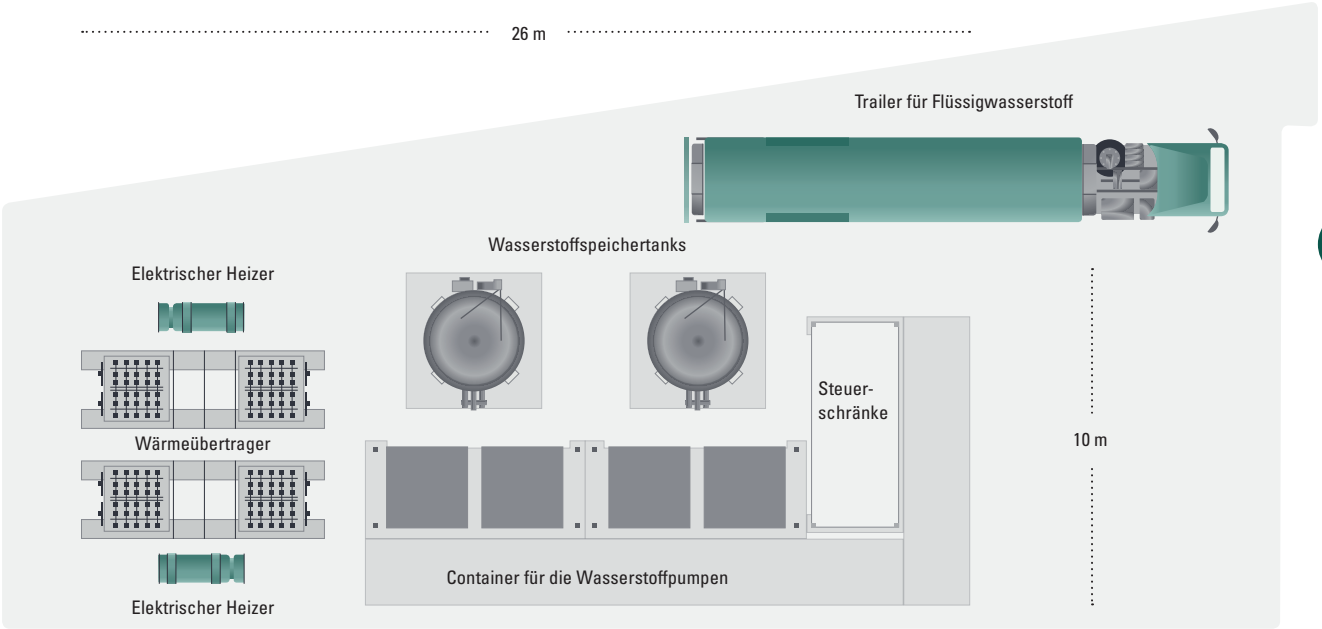
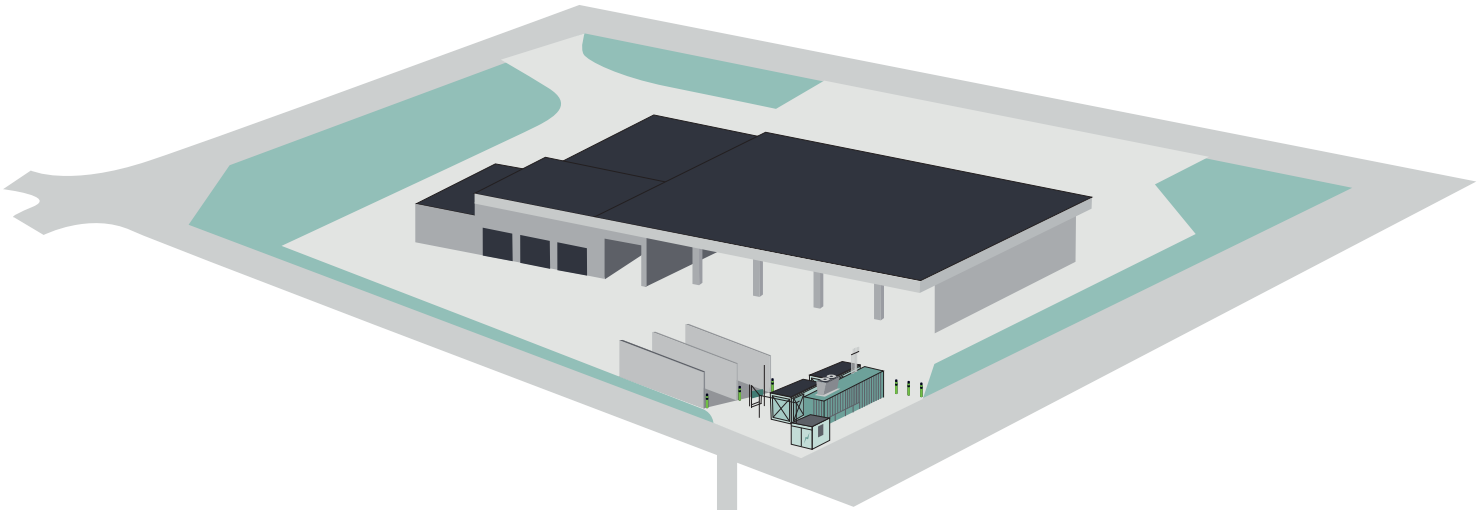


ABBILDUNG 3-7 Beispielhafter Aufstellungsplan der Infrastruktur für 2,5 t Wasserstoff pro Tag – Belieferung über Flüssigwasserstoff (Reuter, et al., 2017)

Der Flächenbedarf für die Ladeinfrastruktur ist davon abhängig, welches Ladekonzept verfolgt wird. Für BZ-REX-Fahrzeuge ist im Prinzip keine Schnellladung erforderlich, daher bieten sich Ladesäulen mit 30 – 50 kW Ladeleistung an. Hier kann man mit ca. 1 m² pro Ladesäule rechnen, die jeweils möglichst nahe am Abstellplatz des Fahrzeuges zu platzieren sind. Darüber hinaus gibt es weitere Möglichkeiten der Ladestromzuführung. Werden die Busse unter Dach abgestellt, kann das Ladekabel bspw. über einen Kabelaufroller von der Decke zugeführt werden.

Je nach bereits vorhandenem Netzanschluss und benötigter Ladeleistung sind noch weitere Transformatoren (ca. 5 m² je Transformator zzgl. Einhausung) zu berücksichtigen, welche allerdings mehrere Ladesäulen abdecken können.

Abbildung 3-7 zeigt einen beispielhaften Aufstellungsplan für eine Wasserstoffinfrastruktur mit einem täglichen Wasserstoffbedarf von 2,5 Tonnen (ca. 100 Busse), die mit Flüssigwasserstoff beliefert wird. Wie oben bereits beschrieben, zeichnet sich eine Anlieferung von Flüssigwasserstoff durch einen relativ geringen Platzbedarf aus. In Abbildung 3-8 ist die Planung der Wasserstofftankstelle auf dem Betriebshof Meckenheim (Regionalverkehr Köln, RVK) zu sehen. Hier wird gasförmiger Wasserstoff angeliefert und direkt in die Hochdruckspeicher überführt.



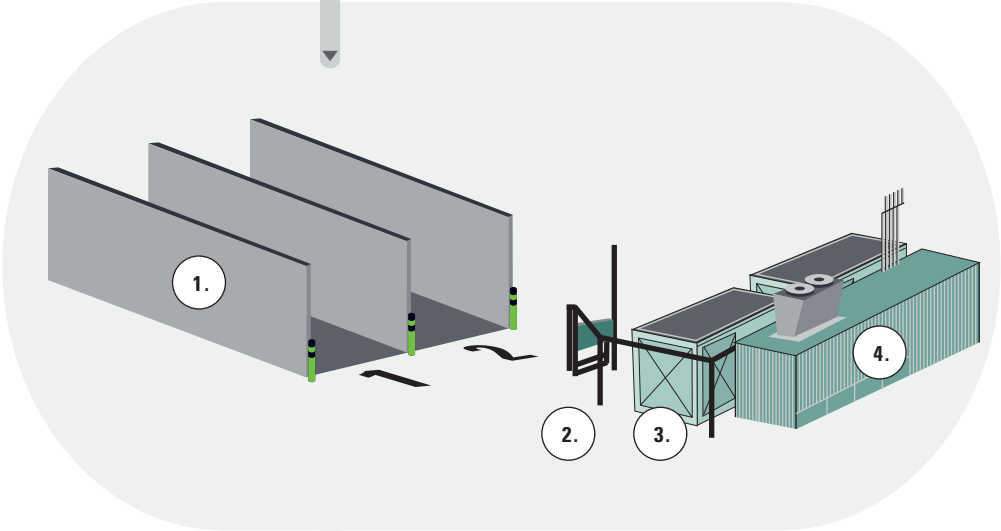
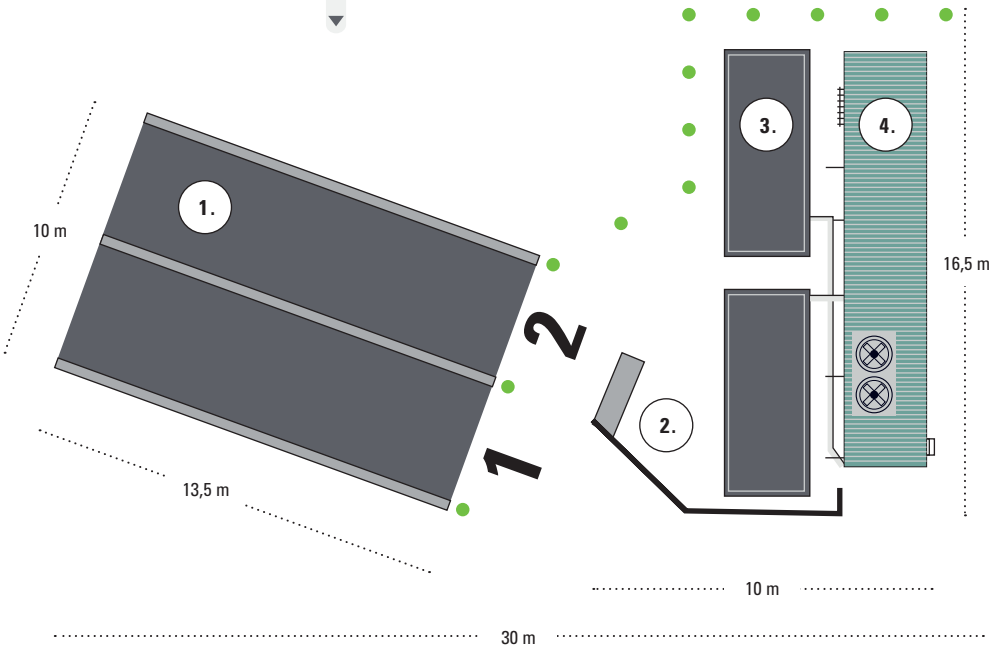


ABBILDUNG 3-8 OBEN: Darstellung der Wasserstofftankstelle (AREVA Konsortium) der RVK auf dem Betriebshof Meckenheim mit einer Kapazität von bis zu 600 kg Wasserstoff / Tag inklusive notwendiger Sicherheitsabstände bzw. baulicher Sicherheitsmaßnahmen (Poller, Schutzwände)

ABBILDUNG 3-8 MITTE UND UNTEN: Detailansicht der Tankstelle mit zwei Trailerstellplätzen **1.** zur Anlieferung des Wasserstoffs. Die Trailer werden über das Kontrollpanel **2.** an die Tankstelle angeschlossen und der gasförmige Wasserstoff über die Verdichter **4.** in die Speicherbänke **3.** befördert. Speicher und Verdichter sind jeweils in 20- bzw. 40-Fuß-Containern untergebracht.



3.6 Netzanschlussleistung

Neben dem Platzbedarf und der logistischen Auswirkungen einer Infrastruktur für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge kommt auch dem Anschluss an das Stromnetz eine besondere Bedeutung zu. Grundsätzlich haben die folgenden Komponenten einen nicht unerheblichen Leistungsbedarf, der vom Stromnetz bedient werden muss:

- Die Wasserstofftankstelle: Die Hauptabnehmer sind hier die Verdichter, welche eine hohe Leistung haben, um den Wasserstoff auf 500 bar zu verdichten. Je nach Größe und Redundanz der Tankstelle müssen bis zu einige Hundert Kilowatt Leistung vorgehalten werden.
- Die Ladeinfrastruktur (bei BZ-REX-Fahrzeugen): Die notwendige Anschlussleistung hängt neben der Batteriekapazität auch von der zur Verfügung stehenden Ladezeit ab. Für die in Tabelle 2-2 gezeigte Fahrzeugkonfiguration reicht normalerweise eine Anschlussleistung von 30 – 50 kW pro Bus aus, um diesen in vier bis sechs Stunden komplett aufzuladen. Für die Beispielflotte (siehe Tabelle 3-1) ergibt sich folglich ein Leistungsbedarf von 1,5 – 2,5 MW. Aufgrund der im Vergleich zu rein batterieelektrischen Bussen[9] üblicherweise geringeren Batteriekapazität fällt die benötigte Anschlussleistung entsprechend geringer und damit kostengünstiger aus. Dies betrifft sowohl die Hardwarekosten als auch die Betriebskosten für die bereitgestellte Anschlussleistung.
- Der Elektrolyseur: Wurde die Entscheidung für eine eigenständige Produktion des Wasserstoffs vor Ort getätigt, muss die dafür notwendige Anschlussleistung vorgehalten werden. Als grobe Faustregel kann mit einem Leistungsbedarf des Elektrolyseurs von ca. 2,6 kW (Herstellerangaben) je Kilogramm Wasserstoff und Tag bei durchgängiger H_2-Produktion (24/7 – Verfügbarkeit typischer Elektrolyseure > 98 %) gerechnet werden. Legen wir die Beispielflotte (50 Busse) mit 1.330 kg/Tag für das reine Brennstoffzellenfahrzeug zugrunde, ergibt sich ein Leistungsbedarf von 3,5 MW. Wird nur in bestimmten Zeitfenstern produziert (bspw. aufgrund günstiger Strompreise oder der Nutzung des Elektrolyseurs zur Netzregelung etc.) ist die Anschlussleistung entsprechend höher zu dimensionieren.

.

Je nach Bustechnologie und Wasserstoffbereitstellungskonzept ist somit gegebenenfalls ein separater Netzanschluss in Form eines Transformators notwendig. Die Strombereitstellung bzw. Leitungslegung zur Tankstelle, zu Ladegeräten und Elektrolyseur muss bei der Planung entsprechend berücksichtigt werden.

9 mit Übernachtladung

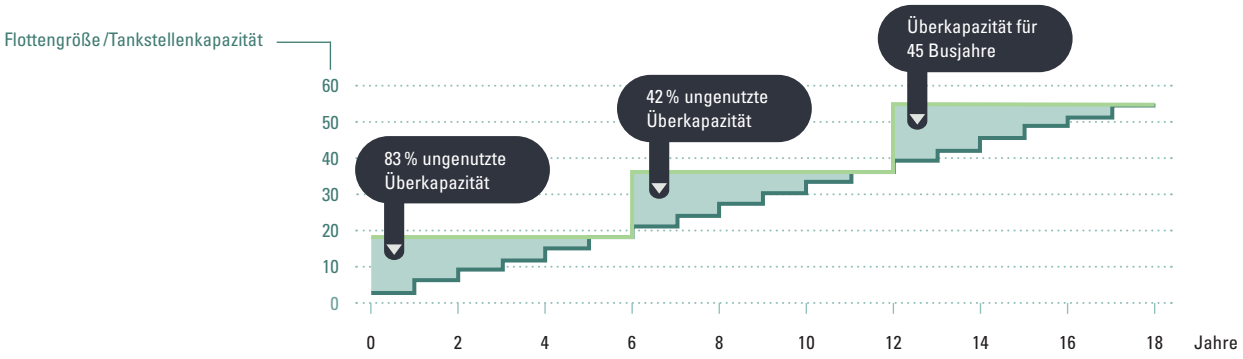
3.7 Ausbauplanung

Im Gegensatz zu Dieselbussen existiert bei Wasserstoffbussen eine stärkere Abhängigkeit der Fahrzeuge von der Ausgestaltung der zugehörigen Infrastruktur. Aufgrund der erhöhten Anschaffungs- und auch Betriebskosten der H_2-Infrastruktur kommt der möglichst konsequenten Anpassung der H_2-Versorgungsinfrastruktur an die Bedürfnisse der Busflotte (und vice versa) eine besondere Bedeutung zu. Dies gilt insbesondere bei der Erweiterung der Busflotte. Eine Ausrichtung der Tankstelle an den Fahrzeugbeschaffungsplänen (üblich sind ca. 5–10 Prozent der Flotte pro Jahr) ist dabei zwar theoretisch die optimale Lösung, praktisch aus vierlei Gründen jedoch nur sehr schwer umsetzbar. Dazu gehören neben Genehmigungsaspekten auch technische und betriebliche Aspekte. So sind bspw. Kompressoren nicht in jeder Leistungsklasse verfügbar und sinnvoll aufeinander abstimmbar. Gleichzeitig bedeutet jeder Umbau das Einholen einer neuen Genehmigung und zusätzlichen organisatorischen Aufwand.

Die Erfahrungswerte der letzten Jahre inbesondere im Rahmen des NewBus-Fuel-Projekts (Reuter, et al., 2017) haben gezeigt, dass es vorteilhaft ist, die Beschaffungspläne für Busse auf die Erweiterung der Tankstelle anzupassen. Dadurch lassen sich Überkapazitäten – welche sich besonders bei kleinen Flotten überproportional auf die Kosten auswirken – weitestgehend vermeiden. Abbildung 3-9 zeigt dies entlang eines Umstellungszeitraums von 18 Jahren für eine Flotte von 54 Bussen. Aufgrund der oben genannten Gründe ist beispielhaft der Ausbau der Tankstelle in drei Schritten dargestellt. Bei der klassischen Beschaffungsplanung (Bild oben) ergeben sich deutlich größere Überkapazitäten als bei der gebündelten Busbeschaffung (im Beispiel alle drei Jahre neun Busse). Grundsätzlich kann der Busbetrieb die Überkapazitäten durch eine weitestgehende Anpassung der Busbeschaffung an die Ausbauplanung relativ gering halten. Bezüglich der Sicherstellung einer hohen Verfügbarkeit der Wasserstoffinfrastruktur bietet es sich an, die Redundanz nicht zwingend über zusätzliche Anlagenkomponenten (z. B. zusätzliche Verdichter) zu gewährleisten, sondern die bestehende Dieselflotte als Rückfallebene zu nutzen. Nach erfolgter Umstellung der gesamten Flotte kann entsprechend wieder auf den bisherigen Beschaffungsrhythmus zurückgegangen werden.

Tabelle 3-3 zeigt eine beispielhafte Übersicht über die Hauptparameter der Infrastruktur für eine Pilotphase sowie für die gesamte Umstellung der Beispielflotte von 50 Bussen (abgeleitet aus Tabelle 3-2). Wasserstoffseitig wird versucht, in der Pilotphase auf aufwendige Redundanzen in der Tankstelle sowie auf einen Elektrolyseur zu verzichten. Die Ladeinfrastruktur hingegen ist recht flexibel anzubringen. Hier kann es gegebenenfalls sinnvoll sein, Ladesäulen erst dann zu beschaffen, wenn die zugehörigen Busse beschafft werden. Der Netzanschluss in Form von Transformatoren sollte hingehen langfristig geplant werden.

Klassische Busbeschaffung und modulare Tankstellenerweiterung



Gebündelte Busbeschaffung und modulare Tankstellenerweiterung

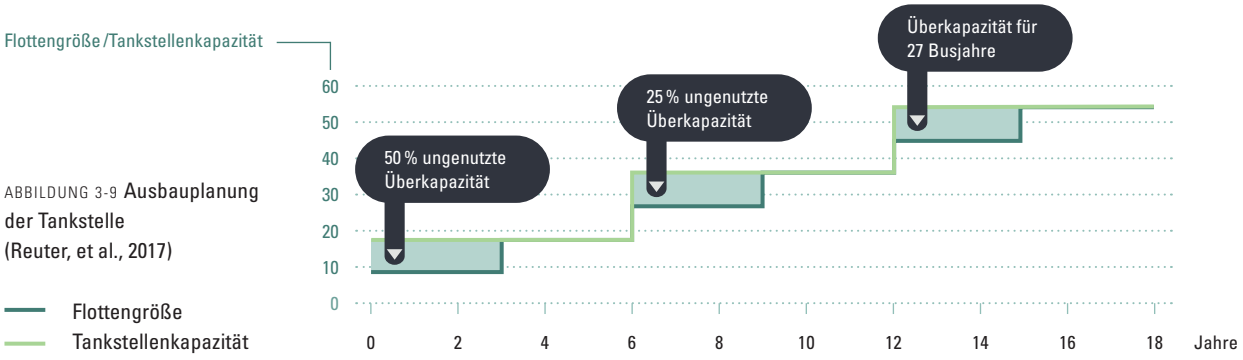


ABBILDUNG 3-9 Ausbauplanung der Tankstelle (Reuter, et al., 2017)

Flottengröße
Tankstellenkapazität

TABELLE 3-3 Auslegungsrichtgrößen für die Infrastruktur

	Pilotphase		Flotte	
Flottengröße	10 Busse		50 Busse	
	BZ	**BZ-REX**	**BZ**	**BZ-REX**
Tagesbedarf Wasserstoff	266 kg	114 kg	1.330 kg	569 kg
Speichergröße Tankstelle	532 kg	228 kg	2.660 kg	1.138 kg
Redundanz	Ggf. ohne Redundanz		Redundante Verdichter, eine zusätzliche Zapfsäule als Backup	
Netzanschlussleistung Tankstelle	ca. 100–200 kW		~ 500 kW	
Netzanschlussleistung Ladeinfrastruktur (nur für BZ-REX mit 50 kW Ladeleistung)[10]		~ 550 kW		< 3 MW (inkl. Leistungsreserve)
Netzanschlussleistung Elektrolyseur			~ 3,5 MW	

10 Die notwendige Netzanschlussleistung ist aufgrund von Scheinleistung etwas höher als die Leistung, die der Verbraucher abnehmen kann. Bei typischen Ladesäulen liegt die notwendige Anschlussleistung circa zehn Prozent höher als die Abgabeleistung.

3.8 Kosten

Wasserstoffbusse sind für die allermeisten Busbetriebe Neuland, die entsprechende Infrastruktur existiert somit nicht und muss beschafft werden. Grundsätzlich gibt es verschiedene Möglichkeiten für das Verkehrsunternehmen, die Anschaffung und den Betrieb der H_2-Infrastruktur anzugehen:

Option 1: Investition und Betrieb durch den Busbetrieb

Option 2: Investition durch den Busbetrieb und Betrieb durch einschlägige Fachunternehmen

Option 3: Investition und Betrieb durch einschlägige Fachunternehmen

Je nach gewünschtem Grad an Involvierung ergeben sich unterschiedliche Kostenblöcke für die Busbetriebe. Im Folgenden wird die zu erwartende Größenordnung an Kosten einer Wasserstoffinfrastruktur bei eigener Investition dargestellt. Entscheidet sich der Busbetrieb bspw. für Option 3, muss er theoretisch nicht investieren, die anfallenden Kosten sind jedoch in anderer Form (bspw. umgelegt auf den Wasserstoffpreis) zu begleichen.

Bei den nachfolgenden Kostenangaben handelt es sich um Grobabschätzungen, die eine erste Einschätzung der zu erwartenden Größenordnung an Kosten ermöglichen soll. Für eine genauere Kostenermittlung ist jeweils eine detaillierte Einzelfallbetrachtung unter Berücksichtigung der konkreten betreiberspezifischen Gegebenheiten durchzuführen.

3.8.1 Investitionsbedarf

Tabelle 3-4 gibt einen Überblick über die Hauptkostenbestandteile einer Tankstelle – exemplarisch für zehn Busse. Den größten Kostenblock bilden erfahrungsgemäß die Trailer für die Anlieferung des Wasserstoffs, gefolgt von Verdichter, Speicher und Zapfsäule. In der Logistikbranche ist es bspw. üblich, dass Spezialtrailer (wie für den Transport von Wasserstoff) nicht im Besitz des Logistikunternehmens sind, sondern dem Kunden gehören. Diese sind somit vom Busbetrieb zu beschaffen.

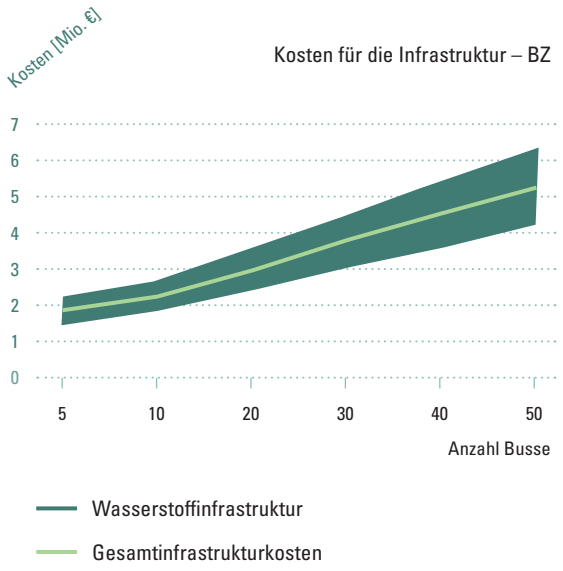


ABBILDUNG 3-10 Investitionskosten der Infrastruktur über die Flottengröße für BZ-Fahrzeuge ohne Elektrolyseur (thinkstep, 2018)

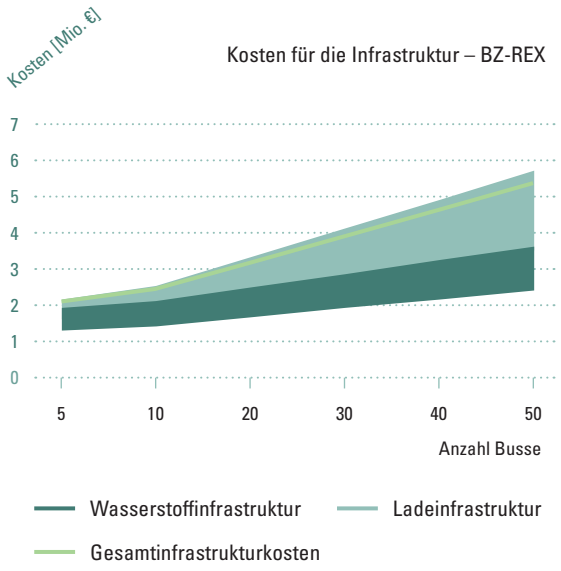


ABBILDUNG 3-11 Investitionskosten der Infrastruktur über die Flottengröße für BZ-REX-Fahrzeuge ohne Elektrolyseur (thinkstep, 2018)

Komponente	Investitionsbedarf
2 Trailer à 250 T€	500 T€
Hochdruckspeicher	250 T€
Verdichter	250 T€
Zapfsäule	200 T€

TABELLE 3-4 Indikativer Investitionsbedarf für die Hauptkomponenten einer Wasserstofftankstelle für zehn Busse

Abbildung 3-10 zeigt die Investitionskosten einer Wasserstofftankstelle für das reine Brennstoffzellenfahrzeug. Zugrunde gelegt ist dabei der in Kapitel 3 ermittelte Wasserstoffbedarf für die Beispielflotte. Mit zunehmender Anzahl der Busse sinken die relativen Kosten pro Bus. Für eine reine Tankstelle für 50 Busse kann mit knapp 5 Mio. Euro gerechnet werden, mit Elektrolyseur würden sich die Kosten auf ca. 12 Mio. Euro erhöhen. Da die Investitionskosten bei kleinen Flotten einen hohen Anteil einnehmen, lohnt sich ein Elektrolyseur üblicherweise erst bei größeren Flotten (siehe auch Abschnitt 3.8.2 Betriebskosten) bzw. entsprechend hohem Wasserstoffbedarf. Aus diesem Grund sind die Kosten der benötigten Lade- und Wasserstoffinfrastruktur der BZ-REX-Fahrzeuge ebenfalls nur für den Fall ohne Elektrolyseur dargestellt (vgl. Abbildung 3-11). Interessanterweise führen die Zusatzkosten der Ladeinfrastruktur nicht zwingend zu signifikant höheren Gesamtkosten.

Neben den Investitionskosten für die Tankstelle bzw. für die Infrastruktur ist auch der Investitionsbedarf für die wasserstoff- und hochvoltgerechte Ertüchtigung der Werkstatt für die Busse zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 4.3). Die dafür anfallenden Kosten können sehr unterschiedlich ausfallen (unterer fünfstelliger bis in den unteren sechsstelligen Bereich) und sind stark von den lokalen Gegebenheiten abhängig: Wie groß ist die Werkstatt bzw. Busflotte? Welche Einrichtungen (z. B. Dacharbeitsstand, Hubkran zum Heben von dachmontierten Komponenten wie H_2-Tanks oder HV-Batterie) gibt es bereits? Steht eventuell ein Neubau an?

Hinsichtlich der gegebenenfalls erforderlichen Finanzierung des zu erwartenden Investitionsbedarfs ist aufgrund der Neuartigkeit der Technologie und der damit verbundenen eingeschränkten Verfügbarkeit von Erfahrungswerten zu eventuell bestehenden finanziellen Risiken zu prüfen, ob der Betreiber gegebenenfalls mit etwas höheren Finanzierungskosten zu rechnen hat.

3.8.2 Betriebskosten

Die laufenden Kosten der Wasserstoff- bzw. Ladeinfrastruktur setzen sich im Wesentlichen aus den Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie aus den Energieträgerkosten zusammen:

1 Wartungs- und Instandhaltungskosten

Die Umfänge der notwendigen Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten werden im Detail in Kapitel 4.2 erläutert. Je nachdem welchen Umfang die Wartungsverträge mit dem Infrastrukturlieferanten haben, kann man von jährlichen Kosten zwischen zwei bis sechs Prozent der Investitionskosten ausgehen. Der obere Wert entspricht dabei einem Full Service-Vertrag, bei dem alle notwendigen Wartungsarbeiten von dem Hersteller durchgeführt werden. Je mehr Kompetenzen der Busbetrieb selbst aufbaut, desto niedriger fallen die externen Wartungskosten aus. Grundsätzlich ist die Ausgestaltung entsprechender Wartungsverträge den Partnern (Busbetrieb und Tankstellenhersteller) selbst überlassen. Es hat sich jedoch als sinnvoll erwiesen, die Verfügbarkeit der Tankstelle (Reaktionszeit des Lieferanten, Verfügbarkeit von Ersatzteilen etc.) vertraglich zu regeln, um den zuverlässigen Betrieb der Busse gewährleisten zu können.

2 Energieträgerkosten

Die Kosten für die Energieträger selbst bestimmen wesentlich die Gesamtkosten, sowohl im Falle der Belieferung (Kosten für Wasserstoff) als auch im Falle der Eigenerzeugung durch Elektrolyse (Kosten für Strom). Im letzteren Fall ist in der Regel ein unterschiedlicher Strompreis für Ladestrom und den Elektrolysestrom anzusetzen, da für die unterschiedlichen Verwendungszwecke teilweise unterschiedliche Steuern und Abgaben anfallen. Für das Laden der Elektrobusse wird seit 01.01.2018 ein reduzierter Steuersatz von 1,14 ct/kWh fällig. Eine Gleichstellung von Schienenbahnen und Bussen ebenfalls hinsichtlich EEG und damit eine Reduktion der EEG-Umlage um 80 Prozent (besondere Ausgleichsregelung für Schienenbahnen nach § 65 EEG) ist derzeit noch nicht gegeben, wird aber von den Busbetreibern angestrebt. Die Strompreisgestaltung für die Elektrolyse ist sehr stark von lokalen Gegebenheiten und somit vom Netzanschluss abhängig. Detaillierte Informationen zu Entlastungsregelungen finden sich in (BDEW, 2018) und im Speziellen für Elektrolyseure in (DENA, 2018). Abbildung 3-10 zeigt den durchschnittlichen Strompreis für Industriekunden aus dem Jahr 2017.

Unter Berücksichtigung der Energiebedarfe aus Kapitel 3.4 ergibt sich für einen Tagesbedarf von 1.330 kg H_2 (vgl. Tabelle 3-2) ein jährlicher Strombedarf von 27,7 Mio. kWh. Als erste Indikation kann man den durchschnittlichen Strompreis für Industrieabnehmer (0,16 – 20 Mio. kWh/Jahr) im Jahr 2017 von 17,1 ct/kWh annehmen (BDEW, 2018).

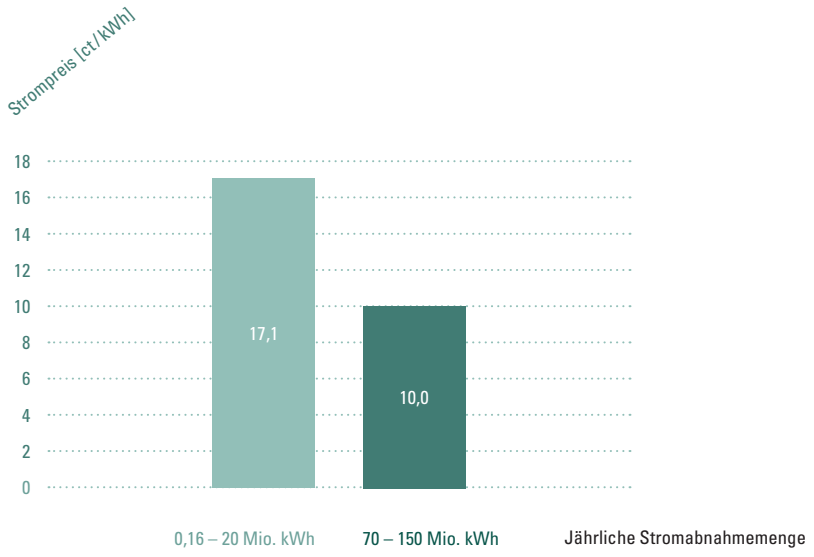


ABBILDUNG 3-12 Durchschnittlicher Strompreis für Industriekunden in Abhängigkeit der Abnahmemenge im Jahr 2017 (BDEW, 2018)

Abbildung 3-13 zeigt die Kosten je Kilogramm getanktem Wasserstoff bei Eigenfertigung in Abhängigkeit des Strombezugspreises für die Elektrolyse. Wird obiger Industriedurchschnitt unter Berücksichtigung der Investitions- und Wartungskosten der Infrastruktur angesetzt (Annahmen siehe Tabelle 3-5), würde sich ein Wasserstoffpreis von ca. 12 Euro ergeben. Um in etwa vergleichbare Energieträgerkosten mit Diesel zu erzielen, liegt der angestrebte Kostenkorridor für Wasserstoff bei 4 – 6 €/kg (Reuter, et al., 2017). Dieser ergibt sich im dargestellten Beispiel für Strombezugskosten von 3 – 6 ct/kWh.

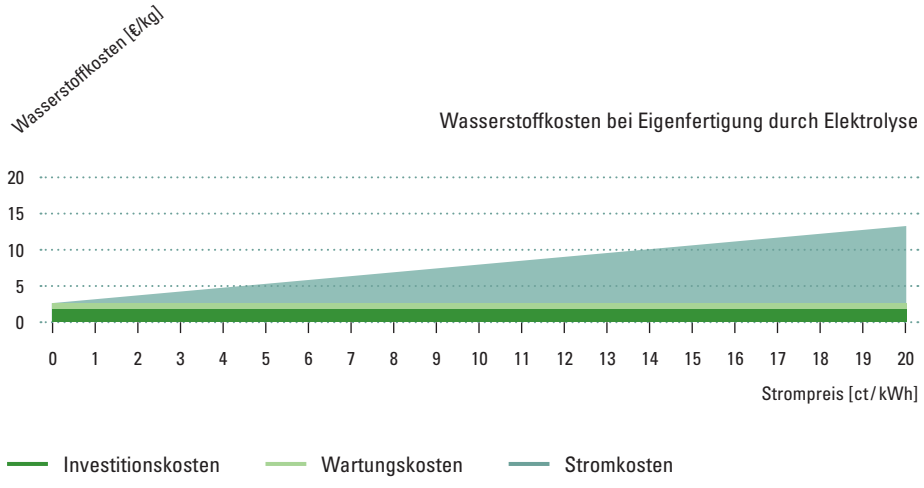


ABBILDUNG 3-13 Abhängigkeit der Wasserstoffkosten ab Zapfsäule vom Strompreis bei Eigenfertigung mit Elektrolyse (thinkstep, 2018)

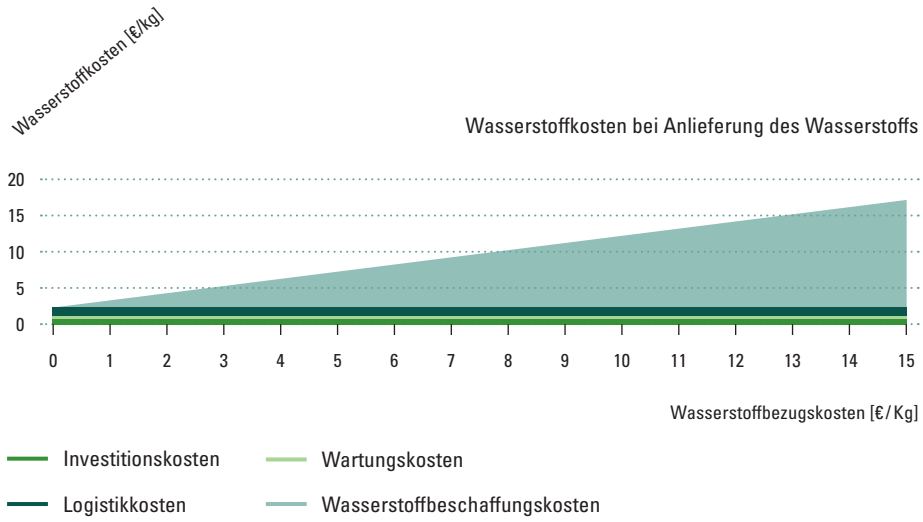


ABBILDUNG 3-14 Abhängigkeit der Wasserstoffkosten ab Zapfsäule von den Wasserstoffbeschaffungskosten bei Anlieferung von Wasserstoff (thinkstep, 2018)

Für die Wirtschaftlichkeit der Elektrolyse ist ein günstiger Strompreis daher entscheidend. Stellgrößen sind neben der Abnahmemenge z. B. die Reduktion von Netzentgelten durch direkten Anschluss des Elektrolyseurs an ein lokales Kraftwerk (PV, Windpark, Müllverbrennungsanlage etc.).

Im Falle der Anlieferung des Wasserstoffs bestehen die laufenden Kosten aus den Wartungskosten der Anlage, den Logistikaufwendungen sowie den Wasserstoffbezugskosten. Abbildung 3-14 zeigt dies in Abhängigkeit der Wasserstoffbezugskosten. Die laufenden Kosten stellen zwischen 80 und 95 Prozent der Gesamtkosten dar. Ausschlaggebend ist hier der Wasserstoffbezugspreis, der basierend auf Erfahrungswerten aus durchgeführten bzw. bereits laufenden Demonstrationsprojekten zwischen 3 und 12 Euro pro Kilogramm liegen kann. Die große Bandbreite ist bedingt durch die Herkunft des Wasserstoffs. Als Nebenprodukt aus der chemischen Industrie ist er oft relativ günstig zu bekommen. Wird er bspw. von Elektrolyseuren bezogen, die relativ geringe Betriebsstunden haben (z. B. Anbindung an einen Windpark an einem Schwachwindstandort), werden sich die H_2-Kosten eher am oberen Ende des Bereichs befinden.

TABELLE 3-5 Annahmen der Kostenrechnung für die Wasserstoffversorgung

	Anlieferung	Eigenfertigung
Lebensdauer Infrastruktur	15 Jahre	
Betriebstage pro Jahr	350	
Wasserstoffbedarf pro Tag	1.330 kg	
Stromverbrauch Elektrolyse [11]		57 kWh / kg Wasserstoff
Logistikkosten	700 € für eine Trailerfahrt[12]	
Wartungskosten	4 % der Investitionskosten (vgl. Abbildung 3-10 und 3-11)	

11 Der Stromverbrauch für den Betrieb der Tankstelle liegt bei etwa 3 kWh/kg Wasserstoff und wurde hier nicht mit berücksichtigt.
12 Ein 200-bar-Trailer fasst ca. 400 kg Wasserstoff.

4 Betriebliche Aspekte

29 BETANKUNG
31 WARTUNG
31 WERKSTATTANPASSUNG
32 MITARBEITER/-INNEN

4.1 Betankung

Da der Busbetrieb eine wesentliche Säule eines funktionierenden ÖPNVs ist, muss die Versorgung der Busse mit Wasserstoff verlässlich funktionieren.

Wie bereits erläutert, strömt der Wasserstoff aufgrund des Druckunterschieds zwischen den Speichertanks in der Tankstelle und dem Bustank in den Bustank über. Der Druck im Speichertank ist dabei entscheidend für die Dauer des Tankvorgangs. Durch die Entnahme von Wasserstoff aus den Speichertanks der Tankstelle sinkt dort der Druck. Mit abnehmender Druckdifferenz nimmt auch die Betankgeschwindigkeit ab. Im Worst Case strömt bei vollständigem Druckausgleich kein Wasserstoff mehr über. Die Auslegung der Tankstelle und das Zusammenspiel zwischen den verschiedenen Speicherbänken und Verdichtern der Tankstelle sind wichtig, um für ein ausreichend hohes Druckniveau und damit für eine ausreichend hohe Betankungsgeschwindigkeit zu sorgen (siehe Kapitel 3).

Unter Berücksichtigung der Tankgrößen aus Tabelle 2-2 dauert eine solche Betankung 5 bis 15 Minuten, abhängig vom Füllstand des Tanks. Entsprechende Protokolle (bspw. SAE J2601) regeln und standardisieren den Tankvorgang. Die Tankgeschwindigkeit ist neben der Dimensionierung der Tankstelle zusätzlich abhängig von der Art der Tankkupplung. Wird diese an den Bus angeschlossen, erfolgt gemäß SAE J2601 ein Prüfstoß mit hohem Druck, um den Füllstand des Tanks zu bestimmen und

eine Leckage ausschließen zu können. Wird eine Tankkupplung ohne Kommunikationsschnittstelle verwendet, erfolgt der Tankvorgang dann anhand von in der Norm hinterlegten Tankkurven. Besitzt die Kupplung eine Kommunikationsschnittstelle, so können höhere Tankgeschwindigkeiten erzielt werden, da zu jedem Zeitpunkt die Drucksituation im Bustank bekannt ist. Letztere Kupplungsart ist jedoch deutlich kostenintensiver und auch empfindlicher gegenüber mechanischer Beschädigung, z. B. durch Herunterfallen der Tankkupplung.

Die Relevanz der Betankungsgeschwindigkeit richtet sich nach der jeweiligen Integration der Betankung in die Fahrzeugversorgung im täglichen Betrieb. Werden bspw. während des Tankvorgangs kurze Inspektions- und Reinigungsarbeiten am Fahrzeug durchgeführt, spielt die Betankungszeit eventuell eine untergeordnete Rolle. Ist der Betriebsablauf derart optimiert, dass direkt nach Ende des Tankvorgangs das nächste Fahrzeug zu betanken ist, kommt der Betankungsgeschwindigkeit eine entsprechend größere Bedeutung zu.

ABBILDUNG 4-1 Wasserstoffbus der Regionalverkehr Köln GmbH beim Tankvorgang (RVK)

Bei der Betankung mit Wasserstoff ist ein Potenzialausgleich (Erdung) zwischen Fahrzeug und Tankstelle während des Tankvorgangs erforderlich (ähnlich wie bspw. bei Erdgasfahrzeugen), um einen möglichen Funkenschlag zu verhindern. Dies lässt sich meist ohne großen Aufwand durch einen elektrisch leitfähigen Fahrbahnbelag an der Tankstelle umsetzen.

Betrachtet man die verschiedenen Fahrzeugtechnologien, so liegt der Hauptunterschied bei der Betankungszeit. Da der Wasserstofftank des BZ-REX üblicherweise kleiner ist als der eines reinen Brennstoffzellenfahrzeugs, ergeben sich entsprechend kürzere Tankzeiten. Weiter muss das Fahrzeug mit BZ-REX-Antrieb über Nacht aufgeladen werden (z. B. per Stecker). Aus betrieblicher Sicht ist das jedoch meist unkritisch, da mit Abstellen des Busses der Ladevorgang gestartet werden kann und keine weitere Betreuung mehr nötig ist. Die Herausforderungen liegen hier eher im Bereich der baulichen Integration der Ladeinfrastruktur (vgl. Kapitel 3.6).

Grundsätzlich sei hier nochmals erwähnt, dass ein Einstieg in die jedwede Art alternativer Antriebe immer mit einem Mischbetrieb aus Bestandsfahrzeugen (z. B. mit Dieselantrieb) und den Bussen mit alternativen Antrieben, bspw. BZ, BZ-REX oder rein batterieelektrischen Fahrzeugen, einhergeht. Dies hat nicht nur Einfluss auf den betrieblichen Ablauf in der Umstellungsphase (und danach), sondern ist auch bei der Ausbauplanung der entsprechenden Infrastruktur (hierzu sei noch mal auf Kapitel 3.7 verwiesen) zu berücksichtigen. Im Falle einer Vollumstellung der Flotte wird dieser Prozess voraussichtlich mehrere Jahre in Anspruch nehmen oder stellt im Falle einer Teilumstellung für den zukünftigen Betrieb einen Dauerzustand dar.

4.2 Wartung

Da der Fokus dieses Dokuments auf der Wasserstoffinfrastruktur liegt, wird auf die Wartung der Fahrzeuge selbst hier nur kurz eingegangen. Grundsätzlich ist der elektrische Antriebsstrang weniger komplex als der Antriebsstrang eines Dieselbusses (Verbrennungsmotor, Getriebe etc. entfallen) und dadurch voraussichtlich wartungsärmer. Gleichzeitig müssen – Stand heute – Brennstoffzelle und Batterie einmal während der Lebensdauer des Fahrzeuges getauscht werden. Zudem fallen kleinere Wartungsarbeiten wie Filterwechsel, Kalibrierung von H_2-Sensoren etc. an. Generell ergibt sich durch die Einführung von elektrischen Antrieben ein verändertes Qualifikationsprofil für das Wartungspersonal (siehe Kapitel 4.4).

Die Wartung der Infrastruktur hingegen ist etwas komplexer als bspw. bei konventionellen Dieseltankstellen: Neben klassischen Wartungsarbeiten wie dem Austausch von Verschleißteilen gilt besonderes Augenmerk den kritischen Bauteilen und deren Überprüfung. Erfahrungen aus den bisherigen Projekten zur Einführung von Wasserstoffbussen haben gezeigt, dass hierzu insbesondere die H_2-Verdichter zu zählen sind. Weiterhin müssen die Wasserstoffspeicher in regelmäßigen Abständen (alle fünf bzw. zehn Jahre) ultraschallgeprüft werden, um Risse frühzeitig zu erkennen und so ein unkontrolliertes Austreten des Wasserstoffs verhindern zu können. Stand der Technik ist mittlerweile auch die Fernüberwachung der Tankstelle, welche bspw. auch die Füllstände überwacht und bedarfsgerecht neue Wasserstofflieferungen anfordert. Weiterhin gibt sie dem Betreiber die Möglichkeit, auf etwaige Störungen zeitnah zu reagieren und diese zu beheben. Wird ein Elektrolyseur eingesetzt, muss auch dieser regelmäßig gewartet und die Stacks nach ihrer Lebenszeit (derzeit ca. zehn Jahre, abhängig von der Betriebsweise) ausgetauscht werden.

Wartungsarbeiten ergeben sich auch für die gegebenenfalls erforderlichen Ladegeräte. Hier bietet sich ebenfalls eine Online-Überwachung und Fernwartung an. Kleinere Wartungsarbeiten (bspw. die turnusmäßige Sichtprüfung, der Luftfilterwechsel) können entweder von eigenem, entsprechend qualifiziertem Personal durchgeführt werden oder werden im Rahmen einer regelmäßigen Überprüfung von einschlägigen Unternehmen erledigt.

4.3 Werkstattanpassung

Die technischen Anpassungen in der Werkstatt lassen sich in fahrzeugbedingte und kraftstoffbedingte Aspekte unterteilen. Beispielsweise 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.

Kraftstoffbedingte Anpassungen sind auf die physikalischen Eigenschaften des Wasserstoffs zurückzuführen. Hier sind die gleichen Maßnahmen zu treffen, die auch bei einem Aufbau einer Tankstelle in geschlossenen Gebäuden nötig sind. Hierzu gehören u. a. entsprechende Lüftungseinrichtungen in Kombination mit Gaswarnanlagen (H_2-Sensoren) sowie ATEX-Einrichtungen (vgl. Kapitel 3.3). Eine gutachterliche Begehung liefert auch hier Klarheit, was im Einzelfall konkret zu tun ist. Für weiterführende Informationen sei auf (BGBahnen, 2009) verwiesen.

4.4 Mitarbeiter/-innen

Im Normalfall sind die Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen in der Regel bis dato noch nicht mit der Wasserstofftechnik in Berührung gekommen. Es ist daher von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche Einführung dieser neuen Technologie, von Anfang an alle Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen mit der neuen Technik vertraut zu machen – sprich entsprechend zu schulen. Dazu gehören neben den Werkstattmitarbeitern und Fahrern auch das Tank- und Fahrzeugversorgungspersonal und die weiteren Mitarbeiter des Depots.

Grundsätzlich sollten alle betroffenen Mitarbeiter eine Einführung in die Wasserstoff- und die Hochvolttechnik bekommen. Die Techniker, die an den Fahrzeugen selbst arbeiten, sollten zudem die Gasanlagenprüfung (GAP) vorweisen können sowie detaillierte Schulungen zum Thema Brennstoffzelle erhalten. Die Erfahrung aus vergangen Projekten zeigt auch, dass die Art und Weise, wie Mitarbeiter und Stakeholder an die neue Technik herangeführt werden, mitentscheidend ist für deren Akzeptanz und damit deren erfolgreichen Etablierung (Warth, et al., 2013). In der BGI5108 „Wasserstoffsicherheit in Werkstätten“ wird neben den konstruktiven Elementen der Wasserstoffwerkstatt auch auf die notwendigen Schulungen der Mitarbeiter eingegangen. Zudem finden sich in Kapitel 6.4 noch einige weiterführende Links zu diesem Thema.

5 Umwelteffekte

33 TREIBHAUSGASEMISSIONEN (THG)
36 LUFTSCHADSTOFFE UND LÄRM

5.1 Treibhausgasemissionen (THG)

Im Gegensatz zur Verbrennung von Diesel in einem Verbrennungsmotor wird bei der Umwandlung von Wasserstoff in Strom kein CO_2 freigesetzt. Auch bei der Verbrennung von Wasserstoff entstehen keine CO_2-Emissionen. Vielmehr ist die Herstellung des Wasserstoffs hinsichtlich der Treibhausgasemissionen und seiner Umweltwirkungen insgesamt entscheidend. Eine Betrachtung von Wasserstoff als Kraftstoff für Busse ist somit nur unter Berücksichtigung der Emissionen bei der Wasserstoffherstellung seriös und sinnvoll. Abbildung 5-1 zeigt die THG-Emissionen (gemessen in CO_2-Äquivalenten) der in Kapitel 3.2 dargestellten Wasserstoffherstellungsverfahren bezogen auf 100 gefahrene Buskilometer im Vergleich zur Herstellung und Verbrennung von Diesel (bezogen auf einen beispielhaften Verbrauch von 38 l Diesel und 9,5 kg Wasserstoff pro 100 Kilometer, 12-m-Bus).

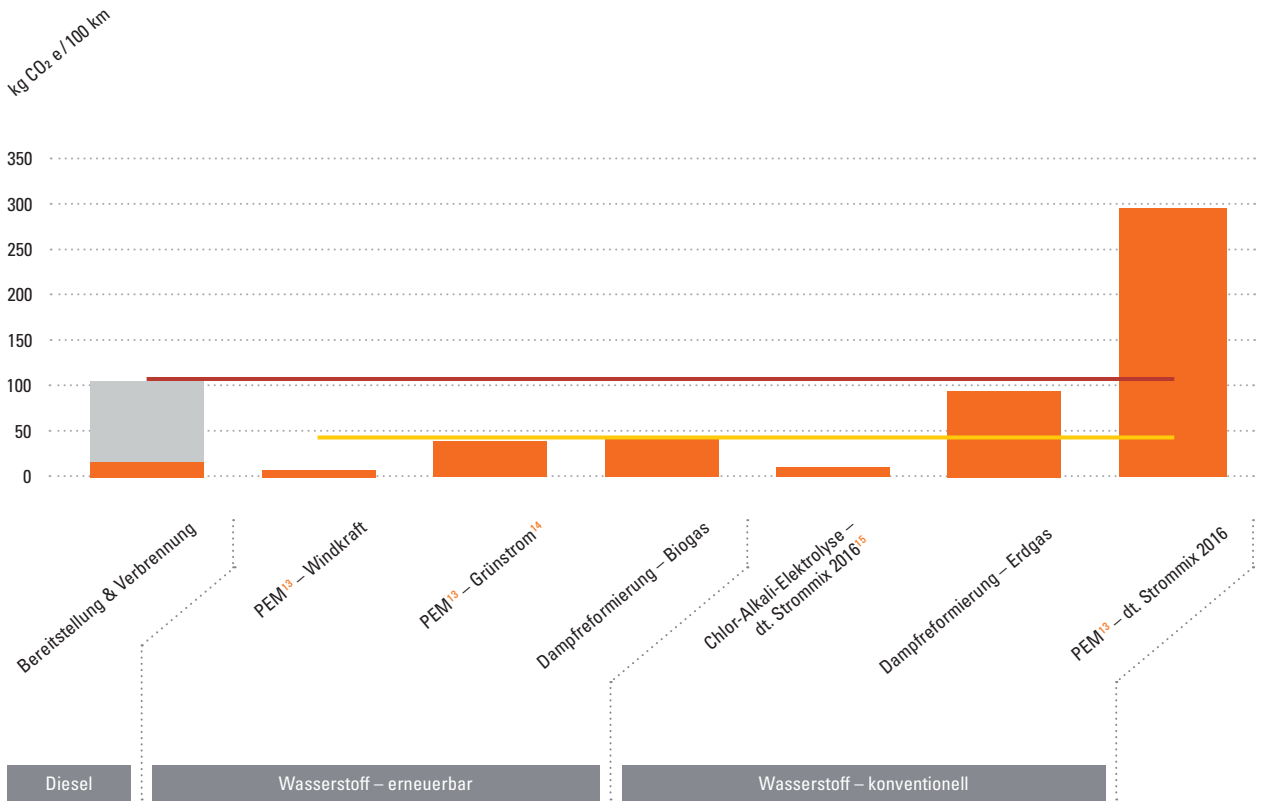


ABBILDUNG 5-1 THG-Emissionen (CO_2-Äquivalente) der Herstellung von Wasserstoff im Vergleich zur Dieselbereitstellung und -verbrennung bezogen auf 100 Kilometer (thinkstep GaBi Datenbank 2018, (CertifHy, 2016))

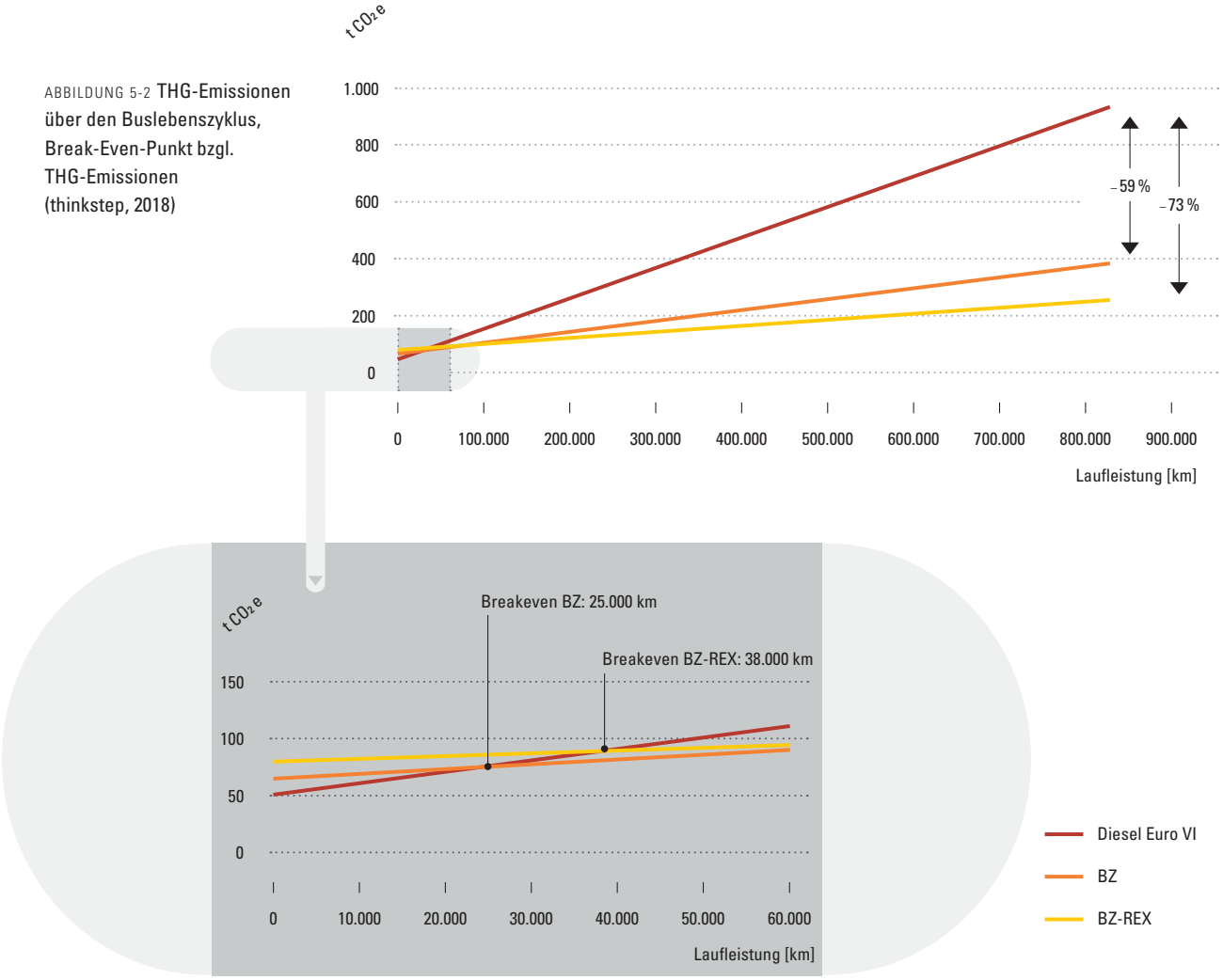
13 Die PEM (Protonen-Austausch-Membran) und die alkalische Wasserelektrolyse stellen zusammen die beiden gebräuchlichsten Elektrolyseverfahren zur Wasserstoffherstellung dar.
14 Grünstrom = Strommix entsprechend der Zusammensetzung des EE-Anteils im dt. Strommix 2016
15 Chlor-Alkali-Elektrolyse: Allokation nach Masse

Es zeigt sich, dass nicht alle H_2-Bereistellungspfade automatisch zu einer Reduktion der Treibhausgase beitragen. Der Auswahl der H_2-Quelle kommt damit eine besondere Bedeutung zu. Über eine Reduktionspotenzial verfügen im Wesentlichen nur die Technologien, die Wasserstoff unter Verwendung erneuerbarer Ressourcen erzeugen. Wasserstoff, welcher als Nebenprodukt bei der Herstellung von Chlor (Chlor-Alkali-Elektrolyse) anfällt, bildet eine Ausnahme. Da bei der Chloralkalielektrolyse mehrere Produkte (Natronlauge, Chlor und als Nebenprodukt Wasserstoff) anfallen, ist eine Allokation, d.h. eine Verteilung der prozessbedingt ein- und ausgehenden Stoff- und Energieströme auf die einzelnen Produkte vorzunehmen. Im Einklang mit der aktuellen Praxis der Chemieindustrie, resultieren die dargestellten Treibhausgasemissionen für den als Nebenprodukt anfallenden Wasserstoff auf der Verteilung der THG-Emissionen des Gesamtprozesses auf die drei Reaktionsprodukte gemäß ihrer jeweiligen Produktmasse (Allokation nach Masse). Wird ein anderer Ansatz (bspw. eine Zuteilung gemäß Marktpreis oder Energieinhalt) gewählt, können die anteiligen Treibhausgasemissionen für Wasserstoff gegebenenfalls deutlich abweichen.

Um final bewerten zu können, welche Bustechnologie unter Berücksichtigung welcher Energieträger (Diesel, Wasserstoff konventionell / erneuerbar, Batterie mit

Grau-/Grünstrom) über den gesamten Lebenszyklus die geringsten CO_2-Emissionen vorweist, ist eine vollständige Treibhausgasbilanz der Fahrzeuge durchzuführen. Diese berücksichtigt neben der Bereitstellung und Nutzung der Energieträger auch die Herstellung bzw. das Recycling der Fahrzeuge. Man spricht von einem klassischen Lebenszyklusansatz von der Quelle bis zum Rad („well to wheel"). Aufgrund der energieintensiven Herstellungsprozesse der Hauptkomponenten Brennstoffzelle und Hochvoltbatterie haben die alternativen Antriebssysteme in der Herstellung Nachteile, die im andauernden Betrieb zumeist egalisiert werden und ab diesem Zeitpunkt zu Treibhausgaseinsparungen beitragen. Abbildung 5-2 zeigt beispielhaft den Break-Even-Punkt für THG-Emissionen bei Verwendung von Wasserstoff, der mit Strom aus erneuerbarer Energie via Elektrolyse erzeugt wird, und Ladestrom aus erneuerbarer Energie. Dieser liegt bei BZ-Bussen bei 25.000 Kilometer bei einer Gesamteinsparung an THG über den gesamten Lebenszyklus von –59 Prozent im Vergleich zu Diesel Euro VI. Bei BZ-REX-Fahrzeugen amortisieren sich die THG-Emissionen später (bei ca. 38.000 Kilometer), die Reduktion über den gesamten Lebenszyklus beträgt jedoch bis zu –73 Prozent.

ABBILDUNG 5-2 THG-Emissionen über den Buslebenszyklus, Break-Even-Punkt bzgl. THG-Emissionen (thinkstep, 2018)



5.2 Luftschadstoffe und Lärm

Wie bereits in vgl. Kapitel 2.1 erläutert, werden bei wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen lokal keine Schadstoffe ausgestoßen. Stickoxide entstehen in aller Regel nur bei der Verbrennung von Kraftstoffen bei sehr hohen Temperaturen, was bei PEM-Brennstoffzellen nicht zutrifft. Auch Partikelemissionen, die klassischerweise bei der Verbrennung von Diesel entstehen, sind hier kein Thema. Partikel, die bedingt sind durch Reifen- und Bremsenabrieb, sind nicht zwar nicht vermeidbar, sie sind aber geringer als bei Dieselbussen, da durch die Rekuperation die Bremse weniger genutzt werden muss.

Der elektrische Antriebsstrang führt zudem zu einer Minderung bzw. Vermeidung der lokalen Lärmbelastung. Bei der Wasserstofftankstelle selbst treten erhöhte Schallemissionen in Verbindung mit den verwendeten Kühlern (für Verdichter) und den Verdichtern auf. Hier sind ggf. Schallschutzmaßnahmen zu treffen, um diese Emissionen zu reduzieren.

6 Weiterführende Informationen

37 HERSTELLER
40 GESELLSCHAFTLICHE AKZEPTANZ
41 PLANUNG UND GENEHMIGUNG DER INFRASTRUKTUR
44 LITERATUR
45 LITERATURVERZEICHNIS
45 TABELLENVERZEICHNIS
46 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

6.1 Hersteller

Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2 geben eine erste Übersicht über aktuelle Fahrzeug- und Tankstellenhersteller inklusive einiger Leistungsdaten (12-m-Fahrzeug, sofern nicht explizit erwähnt). Aufgrund der dynamischen Entwicklung im Markt erhebt diese jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

TABELLE 6-1 Übersicht verschiedener Bushersteller und Leistungsdaten für 12-m-Fahrzeuge (thinkstep, 2018)

Hersteller	Modell	Antriebsart	Entwicklungsstand	Antriebsleistung
SAFRA (FR)	Businova	BZ	Konzept	250 kW (max)
ebeEUROPA (DE)	Blue City Bus (12/18 m)	k. A.	Erprobung	k. A.
EvoBus (DE)	eCitaro mit BZ	BZ-REX	Konzept (die ersten Busse gehen ab 2021 an die Stuttgarter Straßenbahnen)	2x125 kW (max)
Keyou (DE)	k. A.	VM [16]	Konzept	180 kW (Nenn)
Solaris (PL)	Urbino (12/18 m)	BZ und BZ-REX	Konzept (12 m), Erprobung (18 m, Hamburger Hochbahn)	12 m: 2 x 60 kW (Nenn) 18 m: 240 kW (max.)
Wright-bus (UK)	Pulsar Hydrogen	BZ (aktuell nur als Rechtslenker)	Serie	170 kW (max.)
Van Hool (BE)	A330 FC (12 m)/ Exquicity (18 m)	BZ	Serie	210 kW (Nenn)
Toyota (JP) [17]	Sora	BZ	Serienanlauf	2 x 113 kW (max.)
Foton (CN)	BJ6852	BZ	Serienanlauf	k. A.
Yutong (CN)	k. A.	BZ	Serienanlauf	k. A.

TABELLE 6-2 Übersicht verschiedener Tankstellenhersteller (thinkstep, 2018)

Hersteller	Webseite
Linde	http://www.linde-gas.de/de/index.html
Air Liquide	https://industrie.airliquide.de/warum-ist-wasserstoff-so-besonders
Air Products	http://www.airproducts.de/Industries/Energy/Power/Power-Generation/hydrogen-fueling-stations.aspx
nel	https://nelhydrogen.com/
Schwelm AT	https://www.schwelm-at.de/home-news.html
Maximator	https://www.maximator.de
Framatome (ehemals Areva)	http://www.framatome.com/EN/businessnews-976/deutschland-energiespeicherung.html
McPhy	https://mcphy.com/en/

	BZ-Leistung	Batteriekapazität	Tankgröße	Website
	30 kW (Nenn)	132 kWh	30 kg	http://www.businova.com
	k. A.	k. A.	k. A.	http://www.ebe-europa.com
	30 kW (Nenn)	240 kWh	15 kg	https://www.mercedes-benz-bus.com
	nicht zutreffend	k. A.	40 kg	https://www.keyou.de
	12 m: 60 kW (Nenn) 18 m: 100 (Nenn)	12 m: 29 kWh 18 m: 120 kWh	12 m: 30 kg 18 m: 45 kg	https://www.solarisbus.com
	85 kW (Nenn)	20 kWh	35 kg	http://www.wrightsgroup.com/
	85 kW (Nenn)	36 kWh	39 kg	https://www.vanhool.be/de/opnv/agamma/hybrid-fuel-cell
	2 x 114 kW (max.)	235 kWh	24 kg	https://www.toyota.de
	k. A.	k. A.	k. A.	http://auv.foton.com.cn/en/
	k. A.	k. A.	k. A.	https://en.yutong.com

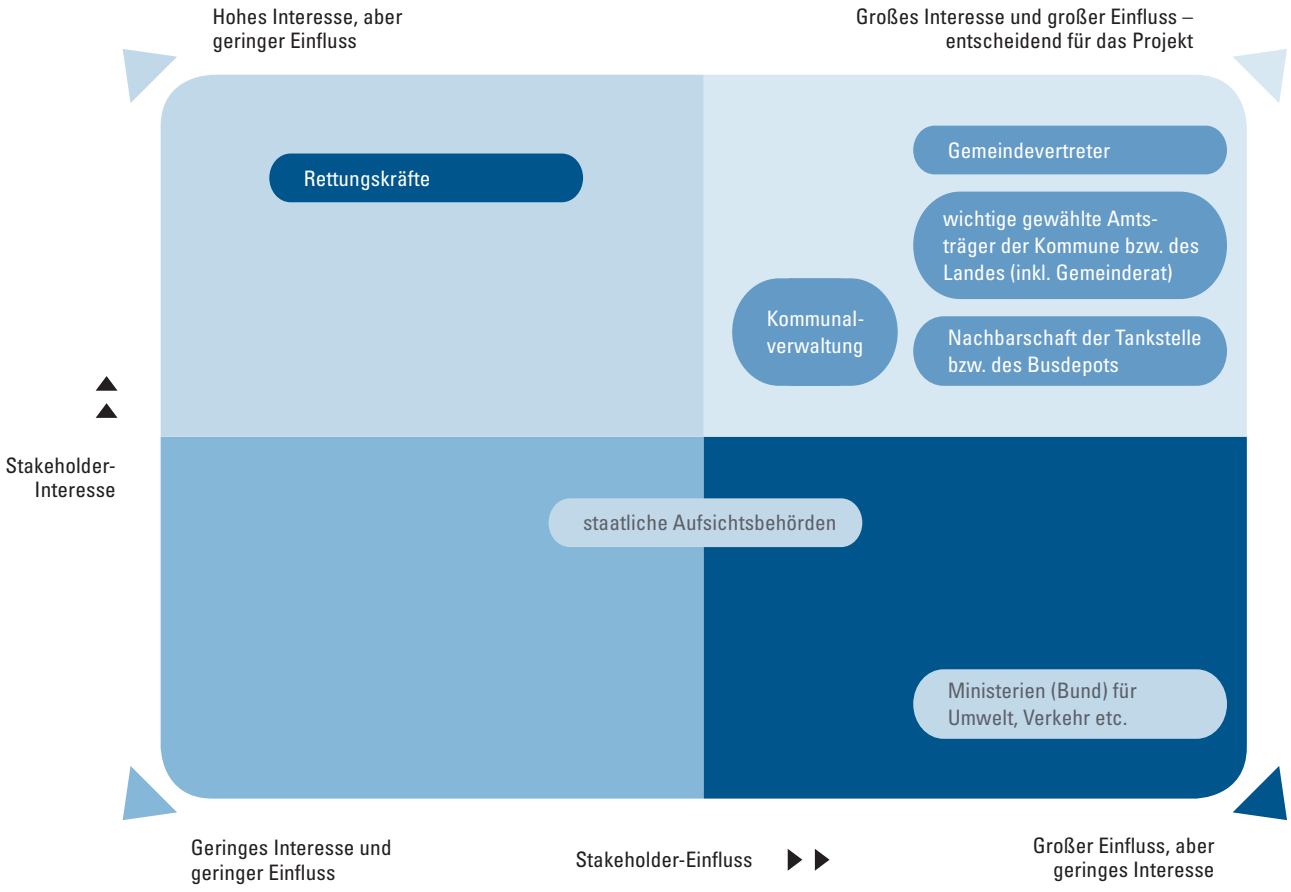
16 Verbrennungsmotor
17 Toyota plant, den gesamten BZ-Antriebsstrang als Systemlieferant an den portugiesischen Busbauer Caetanobus SA zu liefern (E-Mobilität-online, 2018).

6.2 Gesellschaftliche Akzeptanz

Zu einer erfolgreichen Einführung von Wasserstoffbussen und der zugehörigen Infrastruktur gehört nicht nur die erfolgreiche betriebliche Integration, sondern auch die Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer und allen voran auch sozialer Aspekte. Die gesellschaftliche Akzeptanz bildet die Basis für eine erfolgreiche Einführung der Wasserstofftechnologie. Es ist daher enorm wichtig, bereits frühzeitig die relevanten Stakeholder zu identifizieren, die für einen Erfolg des Projekts ausschlaggebend sind. Die Quadranten-Methode (Abbildung 6-1) ermöglicht bspw. eine Einordnung der relevanten Akteure nach den Kategorien Interesse und Einfluss. Je höher der Einfluss und das Interesse einer Stakeholder-Gruppe, desto relevanter ist diese für den Erfolg des Projekts. Für die Wasserstoffinfrastruktur sind das in der Regel:

- Die unmittelbaren Anwohner
- Mitarbeiter, die im täglichen Kontakt mit der Technologie sind (siehe auch Kapitel 4.4)
- Hersteller der Fahrzeuge und der Tankstelle
- Lokale Behörden und politische Entscheidungsträger
- Fahrgäste

ABBILDUNG 6-1 Quadranten-Methode zur Analyse der relevanten Stakeholder (Rouvroy, 2008)



Eine detaillierte Aufstellung, wann im Projekt welche Stakeholdergruppe involviert werden sollte, findet sich in (Rouvroy, 2008). Die Erfahrung aus vergangenen Projekten hat gezeigt, dass die gesellschaftliche Akzeptanz der Wasserstofftechnologie insgesamt sehr gut ist (Bas van Bree, 2010), insbesondere hinsichtlich des Themas Sicherheit.

6.3 Planung und Genehmigung der Infrastruktur

Im Rahmen des NewBusFuel-Projekts wurde ein Planungsleitfaden – zugeschnitten auf die spezifischen Eigenheiten einer Wasserstoffinfrastruktur – entwickelt (siehe Abbildung 6-2). Die Identifikation der relevanten Stakeholder und die Kommunikation mit ihnen (Kapitel 6.2) ist dabei von entscheidender Bedeutung. Sie bildet die Basis für ein erfolgreiches Projekt und sollte im Rahmen dessen kontinuierlich an die Gegebenheiten angepasst werden. Bis zum tatsächlichen Bau der Infrastruktur werden folgende Planungsschritte vorgeschlagen:

1. Vorbereitende Aufgaben (bspw. Machbarkeitsstudien etc.)
2. Bestimmung der Hauptparameter der Infrastruktur (Wasserstoffbedarf, Anlieferungskonzepte, Örtlichkeiten etc.)
3. Definition der Rahmenbedingungen (Ziele, Prioritäten, Einschränkungen, Zielkonflikte etc.)
4. Lastenhefterstellung (technische Randbedingungen, Versorgungssicherheit, maximal vorhandene Fläche, Verfügbarkeit der Tankstelle, Auswirkungen auf die Umwelt etc.)
5. Dialog mit möglichen Lieferanten (Informationsanfragen, Angebotseinholung, weitere Optimierung des Lastenhefts in iterativem Prozess, Definition passender Geschäftsmodelle, Definition von Verantwortlichkeiten etc.)
6. Finale Lastenhefterstellung (inklusive aller technischer, organisatorischer und juristischer Aspekte) und Ausschreibung der Infrastruktur

Grundsätzlich handelt es sich hierbei um einen iterativen Prozess. Das Projekt entwickelt sich durch die Kommunikation und Interaktion mit den relevanten Stakeholdern kontinuierlich weiter. Detailliertere Informationen finden sich in (Reuter, et al., 2017).

ABBILDUNG 6-2 Ablauf eines Projekts zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur (Reuter, et al., 2017)

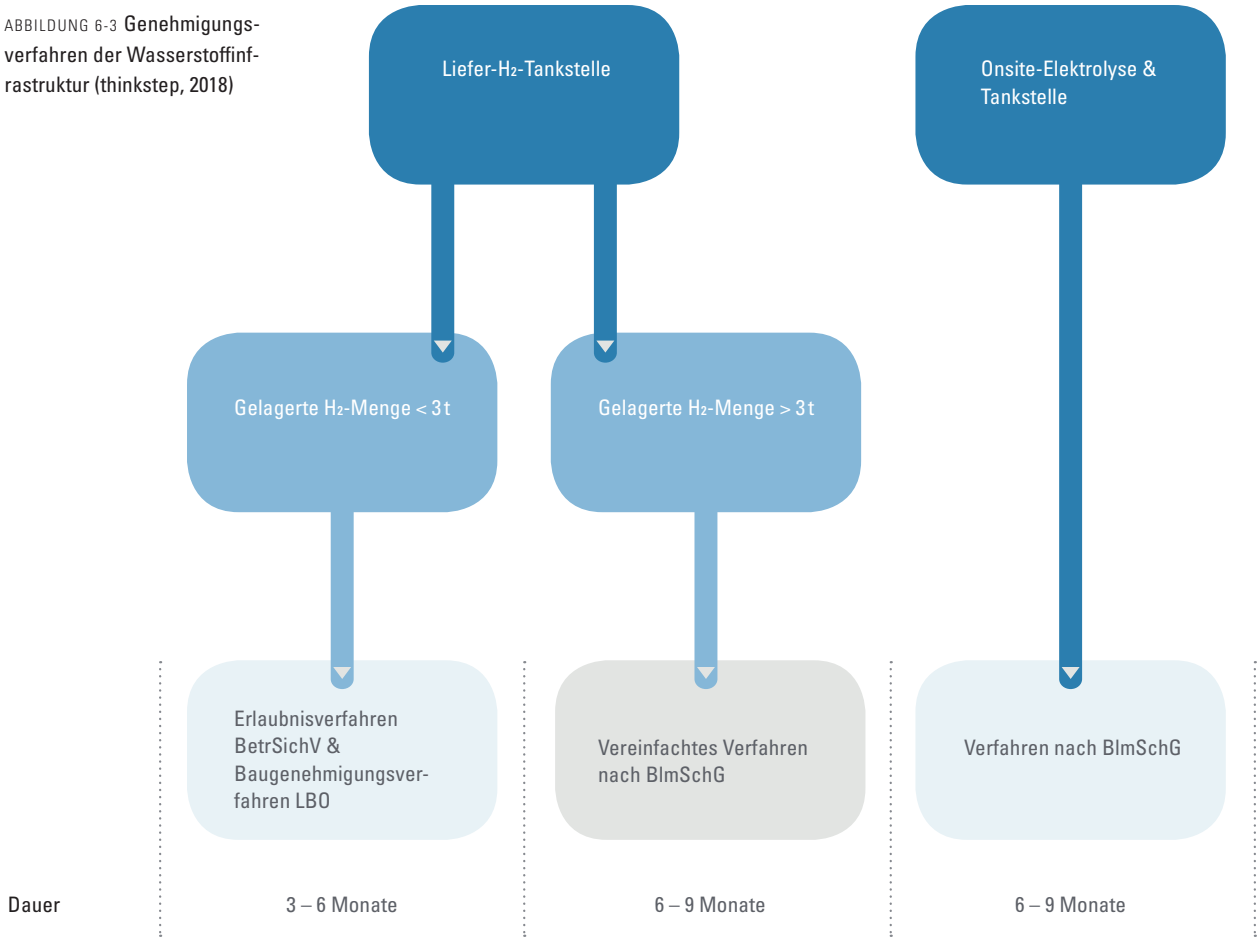
Ein relevanter Stakeholder sind die lokalen Zulassungsbehörden, welche für die Genehmigung der Anlage zuständig sind. Diese gilt es, so früh wie möglich mit in das Projekt zu integrieren. Die Beantwortung der folgenden Fragen bestimmt im Prinzip, nach welchem Verfahren (vgl. Abbildung 6-3) eine Genehmigung erfolgen kann:

1 Wird Wasserstoff angeliefert oder vor Ort erzeugt?
2 Übersteigt die gelagerte Wasserstoffmenge drei Tonnen?

Für Betankungsanlagen ohne Wasserstofferzeugung mit einer gelagerten Menge von weniger als drei Tonnen sind für die Zulassung die Landesbauordnung (BauO) sowie die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) ausschlaggebend. Bei Vor-Ort-Erzeugung (z. B. durch Elektrolyse) und / oder einer Einlagerung von mehr als drei Tonnen Wasserstoff ist eine Zulassung gemäß dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) sowie der BauO zu beantragen. Typischerweise ist Letztere mit höherem bürokratischem und zeitlichem Aufwand verbunden. Grundsätzlich ist, wie bereits in Kapitel 3.3 und 4.2 erwähnt, eine spezifische Gefährdungsbeurteilung gemäß Betriebssicherheitsverordnung durchzuführen, um die standortspezifischen Randbedingungen berücksichtigen zu können.

Bezüglich genauerer Infos sei auf (EY, 2016) und (LBST, 2011) verwiesen. Die NOW hat zudem bereits einen Leitfaden zum Genehmigungsverfahren von Wasserstofftankstellen veröffentlicht, der detaillierte Informationen zum Genehmigungsprozess liefert (siehe (NOW, 2018)).

ABBILDUNG 6-3 Genehmigungsverfahren der Wasserstoffinfrastruktur (thinkstep, 2018)



6.4 Literatur

- NewBusFuel-Dokumente (detaillierte Informationen und Best-Practice-Ansätze zu Infrastrukturkomponenten, Platzbedarf, Umweltwirkungen, Kosten und Projektablauf) – nur in englischer Sprache verfügbar: http://newbusfuel.eu/publications/
- Genehmigungsleitfaden NOW (Erläuterung zu den einzelnen Schritten des Genehmigungsverfahrens inklusive Auflistung der zuständigen Behörden): https://www.H_2-genehmigung.de/
- NRW-Leitfaden für die Genehmigung von H_2-Tankstellen (Leitfaden für öffentlich nutzbare H_2-Tankstellen) https://www.energieagentur.nrw/content/anlagen/Erlaubnisverfahren_H_2-Tankstellen_2017_Juli.pdf
- Fuel Cell Bus Europe (Informationen zu Wasserstoffbusprojekten in Europa inklusive Erläuterungen zur Technologie, Fahrdaten etc.): https://www.fuelcellbuses.eu/
- NOW-Leitfaden für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderfahrzeugen (Informationen und Erkenntnisse aus einem Pilotprojekt); hilfreich, um einen detaillierteren Eindruck bspw. über notwendige bauliche Maßnahmen zu bekommen: http://www.cleanintralogistics.net/wp-content/uploads/2018/03/LEitfaden-fpr-Wasserbetriebene-Flurfo%CC%88rderzeuge.pdf
- Checkliste und Wasserstoffbedarfsermittlung (Berechnungstool und Fragebogen für die überschlägige Ermittlung des Wasserstoffbedarfs Ihrer Flotte, zum Download): https://www.now-gmbh.de/de/service/publikationen)
- BGBahnen, 2009. BGI 5108 – Wasserstoffsicherheit in Werkstätten (Leitfaden zur Ertüchtigung von Werkstätten für den H_2-Betrieb)

Schulungen

- TÜV Süd-Schulungen (Informationen zu möglichen Schulungsmodulen zur BZ- bzw. Wasserstofftechnik speziell für Busse): https://www.tuev-sued.de/akademie-de/seminare-technik/elektromobilitaet-hochvolttechnik/batterie-wasserstoff

Literaturverzeichnis

- Bas van Bree, I. B., 2010. NEXTHyLIGHTS Deliverable 6.1 – Social acceptance of hydrogen demonstration projects, s.l.: s.n.
- BDEW, 2018. BDEW-Strompreisanalyse Mai 2018.
- BGBahnen, 2009. BGI 5108 – Wasserstoffsicherheit in Werkstätten.
- CertifHy, 2016. http://www.certifhy.eu. [Online] Available at: http://www.certifhy.eu [Accessed 10 2018].
- DENA, 2018. https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9264_Power_to_X_Strombezug.pdf. [Online] [Accessed 10 2018].
- E-Mobilität-online, 2018. [Online] Available at: https://emobilitaet.online/news/wirtschaft/4973-toyota-brennstoffzellen-caetanobus [Accessed 10 2018].
- EY, 2016. Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene.
- Faltenbacher, et al., 2016. Statusbericht 2015/16 – Hybrid- und Elektrobusprojekte in Deutschland.
- Frauenhofer ISE, 2018. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme.
- Hecke, G. V., 2018. EC. [Online] Available at: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/7._presentation_van_hool.pdf
- Hool, V., 2018. Van Hool. [Online] Available at: https://www.vanhool.be/en/news/van-hool-bouwt-40-waterstofbussen-voor-keulen-en-wuppertal-duitsland-copy
- Hydrogenics, 2016. EU P2G platform: Electrolyzer technology of the BioCat project.
- KEYOU, 2018. [Interview] 2018.
- LBST, 2011. Sichere Wasserstoffinfrastruktur.
- NOW, 2018. Genehmigungsleitfaden für Wasserstoff-Stationen. [Online] Available at: https://www.H₂-genehmigung.de/
- Reuter, D. B., Faltenbacher, D. M. & Schuller, D. O., 2017. New Bus Fuel ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots – Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling.
- Rouvroy, S., 2008. HyFLEET:CUTE Deliverable 6.10 – People, Transport and Hydrogen Fuel – Guidelines for Local Community Engagement when Implementing Hydrogen Powered Transport.
- thinkstep, 2018. eigene Recherchen und Berechnungen.
- thinkstep & Prognos, 2017. Nullemissionsnutzfahrzeuge – vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökonomischen Alternative.
- VdTÜV, 2009. Druckgase 514 – Anforderungen an Wasserstofftankstellen.
- Warth, H., Faltenbacher, M. & Rock, A., 2013. CHIC D2.2 – Report on maintenance and training concepts implemented.
- Witkowski, R., 2017. Hydrogenvalley. [Online] Available at: http://hydrogenvalley.dk/wp-content/uploads/2017/09/Solaris-FCB-CPH17-v1.0-12.09.2017-print.pdf

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1	Technologieübersicht	6
TABELLE 2-2	Typische Kenndaten BZ und BZ-REX-Bus ((Hecke, 2018), (Van Hool, 2018), (thinkstep & Prognos, 2017), (Witkowski, 2017))	6
TABELLE 2-3	Beispielhafte Energieverbrauchswerte	7
TABELLE 3-1	Fallbeispiel zur Herleitung des Energiebedarfs	10
TABELLE 3-2	Energiebedarf der Beispielflotte	12
TABELLE 3-3	Auslegungsrichtgrößen für die Infrastruktur	23
TABELLE 3-4	Indikativer Investitionsbedarf für die Hauptkomponenten einer Wasserstofftankstelle für zehn Busse	25
TABELLE 3-5	Annahmen der Kostenrechnung für die Wasserstoffversorgung	28
TABELLE 6-1	Übersicht verschiedener Bushersteller und Leistungsdaten für 12-m-Fahrzeuge (thinkstep, 2018)	38
TABELLE 6-2	Übersicht verschiedener Tankstellenhersteller (thinkstep, 2018)	38

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1-1 Beispiele für Wasserstofftankstellen (Clean Energy Partnership): Links: OMV-Tankstelle am Flughafen Stuttgart mit einem Niederdrucktank (stehender Behälter im Hintergrund) Rechts: Shell-Tankstelle in Berlin mit Flüssig-H2-Trailer (vorne) und Hochdruckbänken (hinten) 4

ABBILDUNG 2-1 Wasserstoffbus der Hamburger Hochbahn beim Tanken an der H2 Tankstelle Hafencity (Vattenfall, Foto: Ulrich Mertens, Atelier für Kunst und Fotografie) 8

ABBILDUNG 3-1 Wasserstoffbezugsmöglichkeiten in Deutschland (EY, 2016) 13

ABBILDUNG 3-2 Komponenten einer Wasserstofftankstelle: Niederdrucktank (hinten links), ionischer Verdichter eingehaust im Container (rechts) und Zapfsäule (vorne links) (Linde, 2018) 14

ABBILDUNG 3-3 Funktionsprinzip einer Wasserstofftankstelle (Reuter, et al., 2017) 15

ABBILDUNG 3-4 Tankvorgang eines Wasserstoffbusses (RVK) 16

ABBILDUNG 3-5 Beispiel eines Elektrolyseurs (Hydrogenics, 2016) 17

ABBILDUNG 3-6 Platzbedarf der Wasserstoffinfrastruktur in Abhängigkeit des täglichen Wasserstoff-bedarfs bei gasförmiger Wasserstoffanlieferung (thinkstep, 2018) 18

ABBILDUNG 3-7 Beispielhafter Aufstellungsplan der Infrastruktur für 2,5 t Wasserstoff pro Tag – Belieferung über Flüssigwasserstoff (Reuter, et al., 2017) 19

ABBILDUNG 3-8 Darstellung der Wasserstofftankstelle (AREVA Konsortium) der RVK auf dem Betriebshof Meckenheim mit einer Kapazität von bis zu 600 kg Wasserstoff / Tag inklusive entsprechender Sicherheitsabstände und Schutzmaßnahmen 20

ABBILDUNG 3-9 Ausbauplanung der Tankstelle (Reuter, et al., 2017) 23

ABBILDUNG 3-10 Investitionskosten der Infrastruktur über die Flottengröße für BZ-Fahrzeuge (thinkstep, 2018) 25

ABBILDUNG 3-11 Investitionskosten der Infrastruktur über die Flottengröße für BZ-REX-Fahrzeuge ohne Elektrolyseur (thinkstep, 2018) 25

ABBILDUNG 3-12 Durchschnittlicher Strompreis für Industrie-kunden in Abhängigkeit der Abnahmemenge im Jahr 2017 (BDEW, 2018) 27

ABBILDUNG 3-13 Abhängigkeit der Wasserstoffkosten ab Zapfsäule vom Strompreis bei Eigenfertigung mit Elektrolyse (thinkstep, 2018) 27

ABBILDUNG 3-14 Abhängigkeit der Wasserstoffkosten ab Zapfsäule von den Wasserstoffbeschaffungs-kosten bei Anlieferung von Wasserstoff (thinkstep, 2018) 28

ABBILDUNG 4-1 Wasserstoffbus der Regionalverkehr Köln GmbH beim Tankvorgang (RVK) 30

ABBILDUNG 5-1 THG-Emissionen (CO_2 Äquivalente) der Herstellung von Wasserstoff im Vergleich zur Dieselbereitstellung und -Verbrennung bezogen auf 100 km (thinkstep GaBi Datenbank 2018, (CertifHy, 2016)) 34

ABBILDUNG 5-2 THG-Emissionen über den Buslebenszyklus, Breakeven-Punkt bzgl. THG-Emissionen (thinkstep, 2018) 35

ABBILDUNG 6-1 Quadranten-Methode zur Analyse der relevanten Stakeholder (Rouvroy, 2008) 40

ABBILDUNG 6-2 Ablauf eines Projekts zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur (Reuter, et al., 2017) 42

ABBILDUNG 6-3 Genehmigungsverfahren der Wasserstoff-infrastruktur (thinkstep, 2018) 43