

Leitfaden

Für
Verkehrsverbund Ost-Region (VOR) GmbH
Europaplatz 3/3
1150 Wien
Österreich



Leitfaden zur Umstellung von Bus- linien auf Wasserstoffbusse

KCW GmbH
Bernburger Straße 27
10963 Berlin, Deutschland

13.04.2021

Finale Fassung

Autoren

Marcel Bauermeister, Elisa Claus, Fabien Laurent, Nabil Nakkash, Julian Nolte

Impressum:

Ersteller dieses Leitfadens:

KCW GmbH

Bernburger Straße 27

10963 Berlin, Deutschland

<https://www.kcw-online.de/>

Inhaltsverzeichnis

1	Zweck des Leitfadens	4
2	Überprüfung zur Einhaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen für Beschaffungen.....	5
3	Analyse bestehender Verkehre	6
3.1	Betriebliche Analyse der Umlaufpläne / Fahrpläne	6
3.2	Räumliche Struktur des Busnetzes	7
3.3	Fahrprofil der Linien – Topographie	7
4	Marktanalyse Wasserstoffbusse	10
4.1	Gefäßgrößen und Anschaffungskosten	10
4.2	Betriebliche Anforderungen	10
4.2.1	Energieverbrauch	10
4.2.2	Reichweite	11
5	Wasserstoffinfrastruktur	12
5.1	Bestimmung des Wasserstoff- und Elektrolyseleistungsbedarfs	12
5.2	Dimensionierung der Wasserstofftankstelle.....	13
5.3	Standortentscheidung der Wasserstoffinfrastruktur	13
5.3.1	Abwägung zentrale / dezentrale Infrastruktur	14
5.3.2	Einfluss Betreibermodell	15
5.4	Kostenabschätzung Wasserstoffinfrastruktur.....	16
5.5	Buswerkstatt.....	16
6	Umgang mit Mehrkosten	17

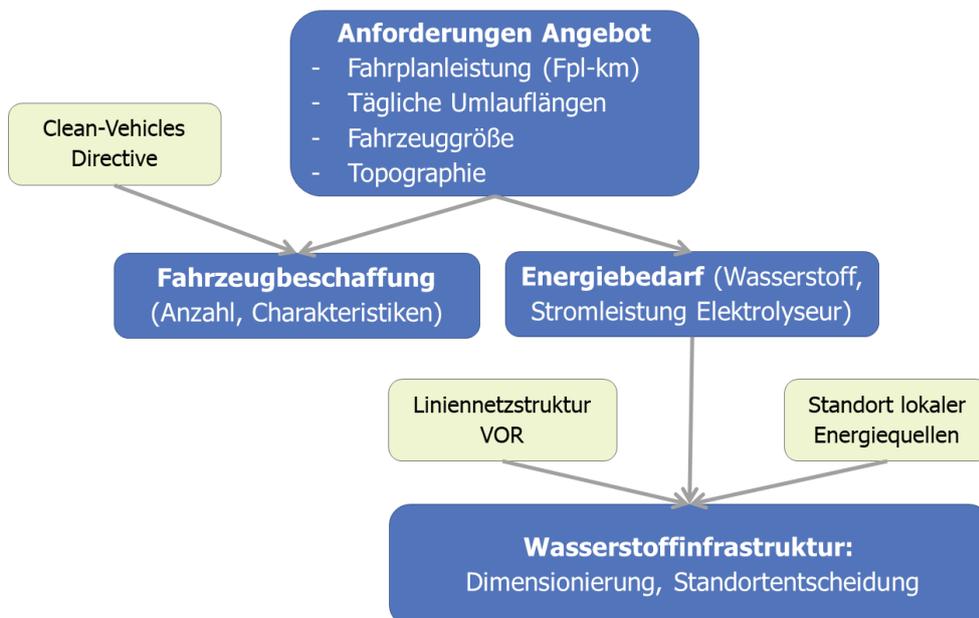
1 Zweck des Leitfadens

In diesem Dokument werden die Schritte und die zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen bei der strategischen Planung der Umstellung von Busverkehren mit konventionellen Antrieben auf Wasserstoffbusse ausgeführt. Dies umfasst insbesondere die folgenden Punkte:

- Analyse der gesetzlichen Verpflichtungen zur Einführung von dekarbonisierten Technologien
- Analyse der bestehenden Verkehre (Anforderungen des Angebots, Liniennetzstruktur) und Ermittlung der betrieblichen Bedarfe
- Analyse der räumlichen Rahmenbedingungen (Topographie, lokale Energiequellen)
- Marktanalyse Wasserstoffbusse
- Analyse der infrastrukturellen Anforderungen an den Betrieb von Wasserstoffbussen
- Umgang Mehrkosten

Die aufgeführten Themen stehen dabei in einem Verhältnis zueinander und werden von weiteren äußeren Faktoren wie beispielsweise den rechtlichen Rahmenbedingungen (Clean Vehicles Directive, kurz CVD) beeinflusst. Dies ist in der folgenden Darstellung ersichtlich:

Abbildung 1: Abhängigkeiten einer Umstellung auf Wasserstoffbusse



Quelle: KCW, eigene Darstellung

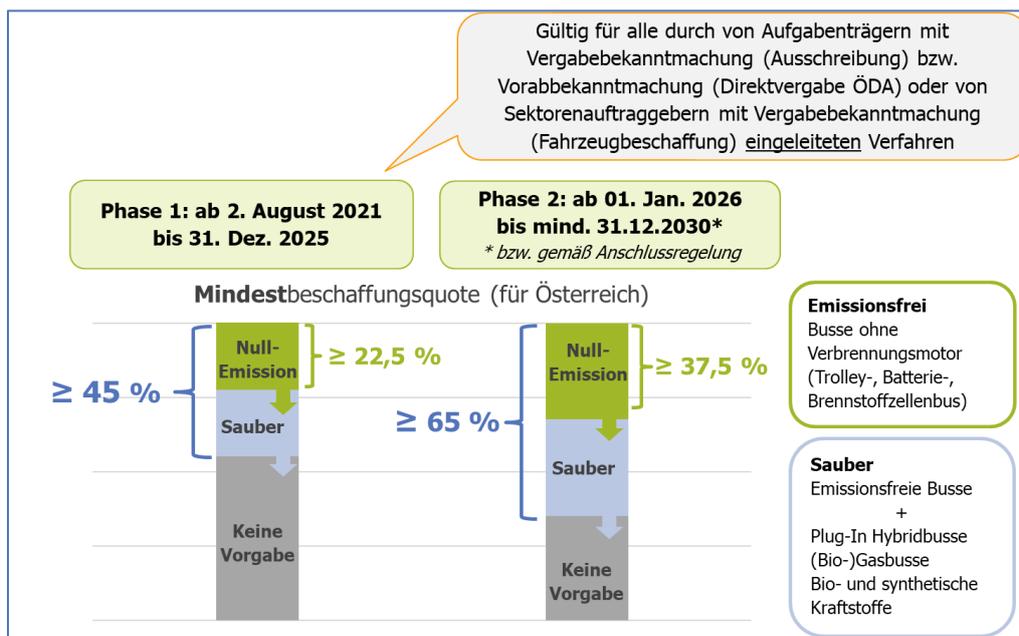
2 Überprüfung zur Einhaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen für Beschaffungen

Bei der Planung der Einführung von Bussen mit alternativen Antrieben sind die Vorgaben der EU-Richtlinie 2019/1161 (Clean Vehicles Directive) zu berücksichtigen, deren Mindestquoten zur Beschaffung bzw. zum Einsatz von sauberen Linienbussen ab dem 03.08.2021 in Kraft treten.

Die Richtlinie gilt nur für Aufträge, bei denen der Aufruf zum Wettbewerb nach dem 02. August 2021 ergangen ist oder bei denen der Auftraggeber das Vergabeverfahren nach diesem Datum eingeleitet hat.

Die EU-Richtlinie verpflichtet erstmals die Mitgliedstaaten auf nationaler Ebene, die folgenden Mindestquoten innerhalb der mehrjährigen Perioden einzuhalten. Entscheidend für die Zuordnung eines Auftrags zur Periode 1 oder 2 ist das Datum, an dem der Auftrag vergeben wird:

Abbildung 2: Mindestquoten der Clean Vehicles Directive für Österreich



Erläuterung: Die Clean Vehicles Directive (Richtlinie legt Mindestquoten für zwei mehrjährige Perioden fest:

1. Periode: Vom 2. August 2021 bis zum 31. Dezember 2025 müssen 45% der in Österreich neu zu beschaffenden Fahrzeuge „saubere“ Busse sein, davon mindestens die Hälfte mit emissionsfreiem Antrieb.

2. Periode: Ab 1. Januar 2026 bis 31. Dezember 2030 steigt die Quote an sauberen Fahrzeugen auf 65%, wovon ebenfalls die Hälfte emissionsfrei angetrieben sein muss.

Die Quoten der 2. Periode gelten über das Jahr 2030 hinaus, sofern keine neuen Quoten beschlossen werden.

Quelle: Darstellung KCW.

Da Wasserstoffbusse keinen Verbrennungsmotor enthalten, sind sie emissionsfreie Fahrzeuge und demzufolge auch saubere Fahrzeuge im Sinne der CVD.

Die Regelung zur Umsetzung in nationales Recht ist noch nicht beschlossen. Eine wichtige Frage ist, ob die Mindestquoten je Bundesland oder je Aufgabenträger, in Form der Verkehrsverbünde, einzuhalten sein werden. Da der VOR die drei Bundesländer Burgenland, Niederösterreich und Wien umfasst, ist dies insbesondere für die Ausschreibungen der Busverkehrsleistungen und die Beschaffungsprozesse der kommunalen Verkehrsunternehmen innerhalb des VOR relevant. Eine Vorgabe je Aufgabenträger wäre einfacher zu koordinieren und umzusetzen. Nach aktuellem Entwurfsstand (Stand Jänner 2021) wird dieser Weg von der Regierung bevorzugt. Jeder Aufgabenträger würde allein oder als Teil eines Bündels von Aufgabenträgern die Mindestquoten erfüllen müssen oder geht das Risiko ein, eine Geldbuße zahlen zu müssen.

Aus diesem Grund ist die vorgesehene Beschaffung von Wasserstoffbussen im Gesamtkontext zu betrachten und durch den Aufgabenträger zu bewerten.

3 Analyse bestehender Verkehre

Im ersten Schritt zur Einführung von Wasserstoffbussen ist eine Analyse der bestehenden Verkehre erforderlich. Sie zielt darauf, die betrieblichen Auswirkungen bei einer Umstellung auf Wasserstoffbusse abzuschätzen und damit die Eignung einer Umstellung einzuschätzen. Aus Sicht der Wirtschaftlichkeit des Betriebs sollte vor allem sichergestellt werden, dass der Fahrzeug- und Fahrpersonalbedarf gegenüber dem Dieselmotortrieb möglichst konstant bleibt und dass die Wasserstoffinfrastruktur für strategisch sinnvolle Standorte geplant wird, wo sie von möglichst vielen Fahrzeugen genutzt werden kann.

Für diese Analyse sind detailliertere Untersuchungen der räumlichen Struktur des Busnetzes, der Umlauf- und Fahrpläne sowie des Fahrprofils der Linien sinnvoll.

3.1 Betriebliche Analyse der Umlaufpläne / Fahrpläne

Mit der Auswertung der Umlauf- und Fahrplandaten können folgende Indikatoren bestimmt und analysiert werden:

- Anzahl Fahrzeuge
- Fahrzeuggröße
- Durchschnittliche tägliche Umlauflängen
- Anteil an langen Umläufen / HVZ-Verstärker
- Wende- bzw. Pausenzeiten
- Linienverknüpfungen

Diese Kennzahlen sind die Grundlage für eine Abschätzung, wie viele Umläufe bzw. Fahrzeuge mit einer bestimmten Reichweite möglichst ohne Mehrbedarfe umgestellt werden können und welche Optimierungspotenziale in den bestehenden Umlaufplänen vorhanden sind.

3.2 Räumliche Struktur des Busnetzes

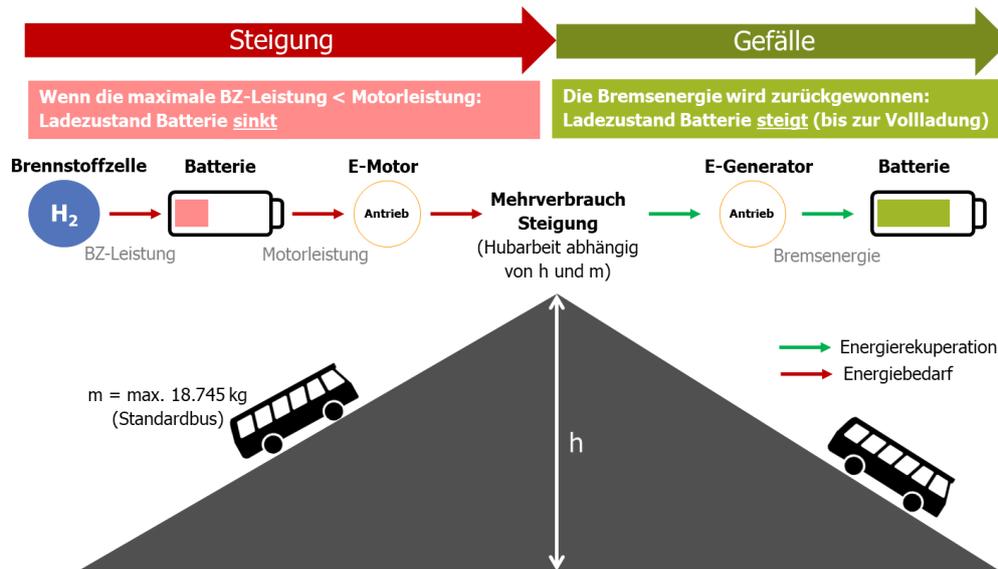
Eine Analyse des Liniennetzes, der nächtlichen Abstellorte und Busbetriebshöfe der Fahrzeuge ergibt weitere wichtige Informationen zur Umstellung:

- Orte der Lenkdienststellen und Busbetriebshöfe
- Verkehrsknoten mit mehreren Linien
- Nähe zu Bahnanlagen oder Betriebshöfen anderer schwerer Nutzfahrzeuge (z.B. SPNV-Fahrzeuge, Müllfahrzeuge, etc.)
- Nähe zu Ökostromerzeugungsanlagen (Wind, Photovoltaik, Wasserkraft) im Sinne der Sektorkoppelung

Diese Daten sind für die Identifizierung sinnvoller Standorte für Tankstellen und Elektrolyseure dienlich (siehe Kapitel 5.3).

3.3 Fahrprofil der Linien – Topographie

Unabhängig davon, welcher Antrieb im Bus eingesetzt wird, muss dieser bei einer Fahrt bergauf zusätzliche Energie liefern, um die Steigung zu bewältigen. Der zusätzliche Energieaufwand ist die sogenannte Hubarbeit. Diese Arbeit ist abhängig von der Masse des Busses sowie vom Höhenunterschied. Der bei der Fahrt in der Steigung erforderliche Mehrverbrauch wird teilweise durch die Rekuperation der Hubarbeit beim Bremsen in den Gefälleabschnitten kompensiert. Dieses Zusammenspiel ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

Abbildung 3 Zusammenspiel Topographie und Energiebedarf


Quelle: KCW, eigene Darstellung

Im Folgenden werden die notwendigen Parameter der Berechnung des Mehrverbrauchs erläutert und beispielhaft dargestellt. Die Hubarbeit ergibt sich aus der folgenden Formel:

- $E = m * g * h$
 - E: Hubarbeit in Joule (1 kWh = 3,6 Mio. Joule)
 - m: Fahrzeuggewicht in kg
 - g: Fallbeschleunigung ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
 - h: Höhenunterschied in m

Bei einem 12-m-Wasserstoffbus mit einem maximalen Gesamtgewicht von 18.745 kg beträgt damit die maximale Hubarbeit bei einem Höhenunterschied von 100 m rein physikalisch etwa 5,11 kWh. Für den Mehrverbrauch in Wasserstoff sind die Wirkungsgrade im Fahrzeug zu berücksichtigen. Es kann ein Fahrzeugwirkungsgrad von 46,75 % angesetzt werden, der sich aus den Wirkungsgraden des Systems Brennstoffzelle/Batterie (55 %) und des Elektromotors (85 %) zusammensetzt. Es ergäbe sich einen Bedarf von 10,93 kWh (ca. 0,33 kg H₂).

Dieser Mehrverbrauch wird teilweise durch die Rekuperation der Hubarbeit beim Bremsen in den Gefällen kompensiert, wobei auch in diesem Fall Energieverluste durch die Umwandlung der potentiellen Energie in Strom und deren Speicherung zu berücksichtigen sind. Bei einem Wirkungsgrad von 85 % des Elektroantriebs als Generator und 90 % für die Batterie ergibt sich eine mögliche Rekuperation der physikalischen Hubarbeit in Höhe von 75 %. Somit könnten vom Mehrverbrauch etwa 3,83 kWh rekuperiert werden.

Auf Basis des kumulierten positiven und negativen Höhenunterschieds auf dem Linienweg einer Linie kann daher schließlich die Auswirkung der Topographie für den durchschnittlichen Verbrauch auf einer Linie ermittelt werden. Der tatsächliche Mehrverbrauch in diesem Beispiel würde etwa 7,10 kWh (ca. 0,21 kg H₂) betragen.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass aufgrund der anspruchsvollen Topographie auch höhere Anforderungen an die technische Ausrüstung der Busse vorzusehen ist. Die Batterie und die Brennstoffzelle der wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge sind so zu dimensionieren, dass die Busse lange Fahrten bergauf bewältigen können:

- Die Fahrzeugbatterie muss in der Lage sein, hohe Entladeleistungen während längerer Zeiten ohne kritische Überhitzungen zu liefern, um den Elektroantrieb bei Bergfahrten entsprechend zu versorgen.
- Das Zusammenspiel zwischen Brennstoffzelle und Batterie muss so dimensioniert werden, dass die Batterie auch bei den anspruchsvollsten Steigungen im Liniennetz ausreichend Puffer hat, um den Antrieb bis zum Ende der Steigung zu versorgen: Denn bei voller Motornutzung übersteigt die notwendige Motorleistung die Leistung der Brennstoffzelle. Die zusätzlich erforderliche Leistung muss dann aus der Batterie kommen, so dass der Ladezustand der Batterie sinkt. Wenn der Ladezustand der Batterie niedrige zweistellige Prozentwerte erreicht hat, kann das Fahrzeug nur noch mit geringerer Leistung fahren: die Geschwindigkeit wird begrenzt bzw. der Bus wird stoppen, bis die Batterie wieder die nötige Leistung bereitstellen kann.
- Bei der Dimensionierung der Batterie ist zu berücksichtigen, dass die Energierückgewinnung in Gefällen nur bis zu einer Vollladung der Batterie möglich ist und daher von der Batteriekapazität abhängt.

Um die Leistungsfähigkeit der Wasserstoffbusse zu verbessern, kann die Batteriekapazität und/oder die Brennstoffzellenleistung erhöht werden, was allerdings in beiden Fällen mit einer Erhöhung der Fahrzeugkosten einhergeht. Es gilt daher, ein Optimum bei den technischen Eigenschaften der Fahrzeuge zu finden, damit sie mit möglichst wirtschaftlichen Komponenten auf allen Linienprofilen eingesetzt werden können. Bei starken Höhenunterschieden im Linienlaufweg ist der Einbau einer größeren Batterie (ca. 40 kWh) empfehlenswert, um einerseits auf Steigungsabschnitten die erforderliche Leistung bereitstellen zu können und andererseits bei Talfahrten die Rekuperation möglichst vollumfänglich auszunutzen.

Die Anforderungen an die Busse und deren Energieverbräuche hängen demnach vom Linienprofil ab: generell sind lange Steigungen bzw. lange Gefällestrrecken ungünstiger als ein Linienprofil mit häufiger Abwechslung zwischen Steigungen und Gefällen, auf denen die Batterie sich besser innerhalb ihres „Wohlfühlbereichs“ leeren und wieder auffüllen kann.

4 Marktanalyse Wasserstoffbusse

Im zweiten Schritt müssen für die analysierten Buslinien und deren Umlaufpläne die passenden Busse beschafft werden. Dazu ist eine Analyse der spezifischen Fahrzeugeigenschaften der am Busmarkt verfügbaren Gefäßgrößen erforderlich.

4.1 Gefäßgrößen und Anschaffungskosten

Da es bisher nicht für alle Gefäßgrößen (Fahrzeugtypen) Modelle auf dem Markt für Wasserstoffbusse gibt, sollte eine Analyse des Angebots zum Zeitpunkt der Einführung durchgeführt werden.

Darüber hinaus müssen die Anschaffungskosten überprüft werden. Derzeit kostet ein Standard-Wasserstoffbus ca. 625.000 €. In den nächsten Jahren wird mit einem weiteren Preisrückgang gerechnet. Allerdings ist unklar, ob und wann der von Herstellern prognostizierte Zielpreis von ca. 400.000 bis 500.000 € erreicht werden kann. Derzeit gibt es kaum Anbieter für Gelenkbusse und keine Varianten für 15 m-Busse, weshalb für diese Gefäßgrößen der weitere Entwicklungstrend beobachtet werden muss. Näherungsweise könnte mit den folgenden Werten gerechnet werden:

Tabelle 1: Anschaffungskosten Busse

Fahrzeugtyp	Standardbus	15m-Bus	Gelenkbus
Wasserstoffbus	550.000 €	660.000 €	770.000 €

Zur Abschätzung der gesamten Anschaffungskosten sollte die Auswertung der Umlaufpläne des Kapitels 3.1 mit der Anzahl an Bussen je Gefäßgröße verwendet werden. Dabei sind ausreichend Reservefahrzeuge zu berücksichtigen, da diese nicht in den Umlaufplänen enthalten sind.

4.2 Betriebliche Anforderungen

4.2.1 Energieverbrauch

Der Energieverbrauch von Wasserstoffbussen wird durch verschiedene Parameter beeinflusst:

- **Auslastung:** Ein hohes Fahrgastaufkommen wirkt sich auf das Gesamtgewicht des Fahrzeugs aus und schließlich auf den Energieverbrauch.
- **Außentemperatur:** Niedrige und hohe Temperaturen sorgen für höhere Verbräuche der Nebenverbraucher für die Klimatisierung und Heizung des Fahrzeugs.

- **Fahrprofil (Stadt/Umland, Topographie):** Der Energieverbrauch hängt von den topographischen Anforderungen und vom Fahrzyklus ab. Bei einer Fahrt im Umland sind grundsätzlich geringere Energieverbräuche pro Kilometer als im Stadtverkehr zu verzeichnen, da der Bus weniger Beschleunigungs- und Bremsvorgänge aufweist und weniger Zeit für den Fahrgastwechsel benötigt wird, während dem die Türen geöffnet sind und die Innentemperatur beeinflusst wird. (siehe auch Kapitel 3.3)
- **Komponenten:** Die Auswahl der Komponenten für den Bus und deren Eigenschaften (Energieeffizienz der Brennstoffzelle, Verbrauch Nebenverbraucher, ...) wirken sich automatisch auf den Gesamtverbrauch des Busses aus.

Dank seines Elektroantriebs kann ein Wasserstoffbus während des Betriebs einen Teil der Fahrenergie beim Bremsen oder in Gefällen rekuperieren. Für eine optimale Energienutzung durch energiesparsame Fahrweise ist eine Schulung der Fahrer und Fahrerinnen mit elektrischen Bussen von hoher Bedeutung.

Basierend auf den beschriebenen Parametern des Energieverbrauchs muss der potenzielle Energieverbrauch des konkreten Anwendungsfalls abgeschätzt werden. Dazu können Probefahrten mit Leihbussen sinnvoll sein.

4.2.2 Reichweite

Die Reichweite ist vom spezifisch ermittelten Fahrzeugenergieverbrauch und von der Größe des im Fahrzeug eingebauten Wasserstofftanks abhängig. Bei einem beispielhaften Energieverbrauch von 9 kg Wasserstoff pro 100 km beim Standardbus und einer Wasserstoffkapazität des Tanks von 36 kg ist eine Reichweite von 400 km möglich. In jedem Fall sollte dazu eine Analyse des Fahrzeugmarktes erfolgen.

Näherungsweise könnten die folgenden Werte verwendet werden:

Tabelle 2: Überblick Verbrauchswerte Wasserstoffbusse

	Standardbus	15m-Bus	Gelenkbus
Ø Verbrauch (kg H ₂ /100km)	9	10,8	12,6
max. Verbrauch (kg H ₂ /100km)	12	14,4	16,8

5 Wasserstoffinfrastruktur

5.1 Bestimmung des Wasserstoff- und Elektrolyseleistungsbedarfs

Der nächste Schritt besteht in der Ableitung des Wasserstoff- und Leistungsbedarfs anhand der folgenden Parameter:

- durchschnittliche tägliche Fahrleistungen
- spezifische Wasserstoffverbräuche
- Annahmen zum Wirkungsgrad und den Volllaststunden des Elektrolyseurs
- ggf. Zuschläge für anspruchsvolle Bedingungen

Anhand der Umlaufpläne und der spezifischen Energieverbräuche kann der Jahresbedarf an Wasserstoff bestimmt werden. Dazu muss die Umlaufleistung je Verkehrszeit bestimmt werden, bevor diese mit der Anzahl an Tagen im Jahr multipliziert werden. Es bietet sich in der Regel an, auf die folgenden Verkehrszeiten abzustellen:

- Mo-Fr Schule: 185 Tage
- Mo-Fr Ferien: 65 Tage
- Samstag: 50 Tage
- Sonn- und Feiertage: 65 Tage

Für die Dimensionierung der Wasserstoffinfrastruktur ist wiederum der höchste Wasserstoffbedarf der vier Verkehrszeiten relevant. Während bei der Berechnung des Jahresverbrauchs an Wasserstoff die abgeschätzten Energieverbräuche der Busse unterstellt werden, sind hierbei die Worst-Case-Energieverbräuche zu unterstellen. Dies dient als Sicherheitspuffer bei möglichen Schwankungen im Energieverbrauch, damit der Busbetrieb an allen Verkehrstagen sichergestellt werden kann. Dazu können pauschale Aufschläge von 20 bis 30 % (siehe Tabelle 2) auf den normalen Energieverbrauch verwendet werden.

Legt man bspw. einen durchschnittlichen täglichen Bedarf von ca. 1.000 kg Wasserstoff zu Grunde, dann müsste die tägliche Erzeugung der Wasserstoffinfrastruktur für ca. 1.200 bis 1.300 kg Wasserstoff dimensioniert werden.

Als nächstes ist die Wasserstoffinfrastruktur anhand des täglichen Outputs von ca. 1.250 kg Wasserstoff zu dimensionieren. Das heißt, dass der für die Elektrolyse benötigte Strombedarf bestimmt werden muss. Dies kann durch die Verwendung der Wirkungsgrade der Elektrolyseure und Verdichter ermittelt werden. Seitens des Elektrolyseurs ist der Wirkungsgrad von ca. 60 % für die Herstellung und Verdichtung des Wasserstoffs einzubeziehen. Dabei ist der Energiegehalt des Wasserstoffs in Höhe 33,3 kWh pro kg zu berücksichtigen, wie die folgende Beispielrechnung verdeutlicht:

$$\text{Strombedarf Elektrolyseur} = 1.250 \text{ kg} \times \frac{33,3 \text{ kWh/kg}}{0,6} = 69.375 \text{ kWh}$$

Anhand des Strombedarfs kann nun die benötigte Leistung des Elektrolyseurs abgeleitet werden. Dafür sind Annahmen zur Nutzungsdauer des Elektrolyseurs zu treffen. Es ist empfehlenswert eine tägliche Nutzungsdauer deutlich niedriger als 24 h anzusetzen, um die teuren Zeiten der Stromkosten zu vermeiden und die Anlage nicht im Dauerbetrieb zu betreiben.

Nimmt man beispielsweise eine tägliche Nutzungsdauer von 18 h an, so müsste der Elektrolyseur eine Leistung von rund 3,9 MW besitzen, um in dieser Zeit den Wasserstoffbedarf von 1.250 kg zu erzeugen.

5.2 Dimensionierung der Wasserstofftankstelle

Im nächsten Schritt ist die Größe des Wasserstofftanks zu bestimmen. Tankstellen sind mit Zapfsäulen sowie Speicher- und Verdichterkapazität so zu dimensionieren, dass die der Tankstelle zugeordneten Busse an allen Verkehrstagen versorgt werden können. Der abgeleitete Speicherbedarf des Wasserstoffs in kg sollte dem doppelten bis dreifachen Tagesbedarf des höchsten Tagesverbrauchs der vier Verkehrszeiten entsprechen. Somit kann eine ausreichende Wasserstoffversorgung bei kurzfristigen Lieferproblemen sichergestellt werden. Zusätzlich bietet dies die Möglichkeit zur kurzfristigen Ausweitung des Betriebsangebots und dem damit einhergehenden höheren Wasserstoffbedarf.

Bei der Dimensionierung der Anzahl an Zapfsäulen ist eine Betankungszeit von etwa 15 Minuten pro Bus für einen vollen Tank anzurechnen. Kürzere Betankungszeiten unter 10 Minuten sind möglich, aber erfordern eine entsprechende Vorkühlung des Wasserstoffs, was zusätzliche Energieverbräuche seitens der Tankstelle verursacht. Aus betrieblicher Sicht ist deshalb die Anzahl der zu betankenden Busse je Tankstelle und die zeitliche Verteilung der Betankung über den Tag zu berücksichtigen, um die Anzahl der Zapfsäulen festzulegen.

5.3 Standortentscheidung der Wasserstoffinfrastruktur

Bei der Abwägung der potenziellen Standorte für Wasserstofftankstellen sind wirtschaftliche und planerische Aspekte abzuwägen:

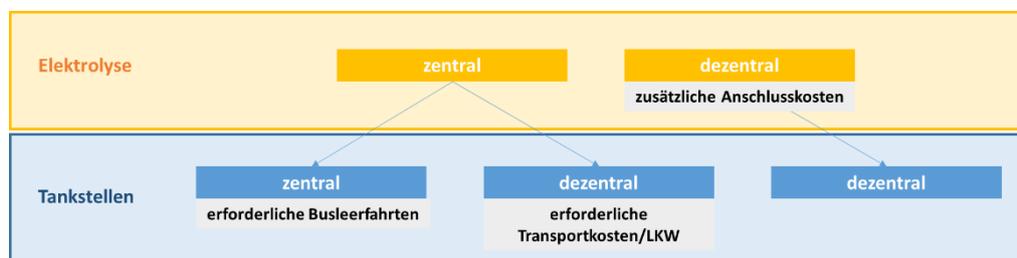
- Anzahl an Bussen im Einzugsgebiet der Tankstelle
- Minimierung von Busleerfahrten
- Entfernung zum Standort der Wasserstoffherstellung
- Flächenverfügbarkeit und deren Kosten
- Bei Elektrolyse: verfügbarer Stromnetzanschluss bzw. Energiequelle
- Einfluss eines Betreibermodells auf die Standortentscheidung

Um die Wasserstoffinfrastruktur möglichst wirtschaftlich zu gestalten, sollten Tankstellen idealerweise zum einen in der Nähe von Elektrolyseuren gebaut werden und zum anderen von mindestens 20 Bussen ohne eine hohe Anzahl an zusätzlichen Leerfahrten genutzt werden können.

5.3.1 Abwägung zentrale / dezentrale Infrastruktur

Der Standort des Elektrolyseurs und damit einhergehend auch jener der Tankstellen hat einen hohen Einfluss auf die Kosten des Wasserstoffs und die Betriebskosten. Dabei muss, wie in der folgenden Abbildung dargestellt, zwischen den zentralen und dezentralen Standorten der Infrastruktur unterschieden werden.

Abbildung 4: Abwägung zwischen zentralen und dezentralen Standorten



Quelle: KCW, eigene Darstellung

Gemäß der obigen Darstellung können somit drei Varianten der Wasserstoffinfrastruktur unterschieden werden:

- Zentral-zentral
- Zentral-dezentral
- Dezentral-dezentral

Die Kombination dezentrale Elektrolyse mit zentraler Tankstelle scheidet in der Betrachtung aus, weil diese grundsätzlich die kostenseitigen Nachteile der drei anderen Varianten kombiniert (zusätzliche Anschlusskosten, erforderliche Transportkosten des Wasserstoffs und zusätzlich erforderliche Busleerfahrten). Sie wäre lediglich denkbar, wenn bei sehr hohen notwendigen Wasserstoffmengen die dafür benötigte Menge an Strom nicht zentral zur Verfügung gestellt werden kann.

5.3.1.1 Zentral-zentral

Die entscheidenden Kostenfaktoren auf der Seite der zentralen Elektrolyse und zentralen Tankstelle bei mehreren Betriebshöfen sind die Betriebskosten für Personale und Treibstoffe der Busleerfahrten. Die Leerfahrten der Busse sind in jedem Fall teurer als die Trailer-Fahrten zur Lieferung des Wasserstoffs, da die Anzahl der Busleerfahrten in der Regel deutlich höher ist als die Anzahl der

Trailer-Fahrten. Deshalb scheidet eine zentrale Tankstelle nahezu in jedem Fall aus.

5.3.1.2 Zentral-dezentral

Bei der zentralen Elektrolyse und dezentralen Tankstellen sind die entscheidenden Kostenfaktoren die Entfernung und Menge an benötigtem Wasserstoff der Betriebshöfe bzw. Tankstellen. Eine Pipeline ist aufgrund der hohen Kosten nur bei sehr großem Wasserstoffbedarf, wie zum Beispiel in der Industrie, lohnenswert. In jedem Fall können die betrieblich aufwändigen Leerfahrten von Bussen zu einer zentralen Tankstelle in dieser Variante vermieden werden. Die Kosten einer Anlieferung per Trailer hingegen zu den dezentralen Tankstellen ist einzelfallabhängig. Näherungsweise kann ein Kostensatz von ca. 3 € pro km für eine Lieferung von 500 kg H₂ pro LKW-Fahrt angesetzt werden. Diese Variante ist umso sinnvoller, je geringer die Anzahl an Bussen pro Betriebshof bzw. Tankstellenstandort ist.

5.3.1.3 Dezentral-dezentral

Ebenfalls möglich ist die vollständig dezentrale Variante der Infrastruktur. Dabei werden mehrere Elektrolyseure und Tankstellen direkt oder in räumlicher Nähe zu den Betriebshöfen errichtet. Dadurch werden auch die betrieblich aufwändigen Leerfahrten zu einer zentralen Tankstelle in dieser Variante vermieden. Eine Anlieferung des Wasserstoffs per Trailer-Fahrt ist in der Regel nicht erforderlich oder über eine sehr kurze Strecke mit entsprechend geringer Kostenwirkung. Kosten entstehen bei dieser Variante insbesondere durch die höhere Anzahl an Elektrolyseuren, die einen Anschluss an das Stromnetz benötigen und somit einmalige Zutrittskosten und jährliche Anschlusskosten verursachen. Sofern diese Kosten durch den Einspareffekt bei den Trailer- und Leerfahrten überkompensiert werden können, ist diese Variante vorteilhaft.

Die relative Vorteilhaftigkeit der jeweiligen Varianten kann ohne konkreten Anwendungsfall nicht pauschal bewertet werden.

5.3.2 Einfluss Betreibermodell

Prinzipiell sind unterschiedliche Betreibermodelle denkbar. So könnte je nach Vorgaben der Ausschreibung der Busverkehrsleistungen das Busunternehmen eigenverantwortlich für die Wasserstoffinfrastruktur (Anschaffung und Betrieb von Elektrolyseuren und Tankstellen) sein, es könnten öffentliche Tankstellen genutzt werden oder die Wasserstoffinfrastruktur könnte durch den Aufgabenträger bereitgestellt werden. Mit verschiedenen Betreibermodellen sind insbesondere die Verteilung der Kostenrisiken zwischen den Akteuren verbunden. Gleichzeitig haben Betreibermodelle aber auch einen Einfluss auf die Standortentscheidung der Wasserstoffinfrastruktur: Denn eine Zuständigkeit im Bereich der Busunternehmen dürfte eher zu kleineren, dezentralen Standortstruk-

turen führen, während eine zentraler Standort eher in einem Modell einer öffentlichen Tankstelle bzw. bereitgestellter Wasserstoffinfrastruktur realisierbar erscheint.

Darüber hinaus sind je nach Betreibermodell Synergieeffekte möglich. Diese können z. B. in der gemeinsamen Nutzung mit anderen Verbrauchern wie dem SPNV, anderen Busunternehmen oder Dritten bestehen und sich vorteilhaft auf die Kostenabschätzung auswirken.

5.4 Kostenabschätzung Wasserstoffinfrastruktur

Die Kosten der Wasserstofftankstelle können näherungsweise anhand der im Kapitel 3.1 bestimmten Anzahl an Fahrzeugen bestimmt werden. Pro Bus sind die Investitionskosten bei geringer Anzahl an Fahrzeugen vergleichsweise hoch. Dies relativiert sich bei größerer Anzahl an Fahrzeugen. Bei Tankstellen für etwa 10-20 Fahrzeuge ist mit ca. 150.000 bis 200.000 € pro Bus zu rechnen. Ab mindestens 30 Bussen können Investitionskosten in Höhe von ca. 100.000 bis 120.000 € pro Fahrzeug erreicht werden. Ab etwa 40 Fahrzeugen sind Investitionskosten von ca. 100.000 € pro Fahrzeug realistisch. Die Angaben können jedoch je nach Anwendungsfall und lokalen Rahmenbedingungen variieren. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit öffentliche Tankstellen zu nutzen und sollte in jedem Fall geprüft werden.

Zusätzlich sind die einmaligen Anschlusskosten und dauerhaften Entgelte des Stromanschlusses zu berücksichtigen. Diese sind von der Höhe des täglichen Strombedarfs abhängig, da – in Abhängigkeit von der installierten Elektrolyseleistung – ein Anschluss sowohl an das Mittelspannungsnetz als auch das Hochspannungsnetz möglich sein kann. Darüber hinaus sind diese Kosten von den jeweiligen Vorort-Bedingungen des gewählten Standortes des Elektrolyseurs abhängig und sollten mit dem lokalen Energieversorger besprochen werden. Sofern sich der Elektrolyseur in direkter räumlicher Nähe der Stromquelle (z. B. Windkraftanlage) befindet, können diese Kosten ggf. entfallen.

Die Kosten des Elektrolyseurs können derzeit mit pauschal 900 € pro kW angenommen werden. Aufgrund des verstärkten Ausbaus und der Weiterentwicklung in den nächsten Jahren sollte dieser Wert regelmäßig verifiziert werden. Bei einem Elektrolyseur mit einer installierten Leistung von bspw. 3,9 MW würden somit Kosten von rund 3,5 Mio. € entstehen.

Des Weiteren kann Flächenerwerb oder die Pacht von Flächen erforderlich sein und muss ggf. in den Gesamtkosten berücksichtigt werden.

5.5 Buswerkstatt

Die Ausrüstung einer Werkstatt muss für die Wasserstofffahrzeuge angepasst werden. Dies betrifft vor allem Einrichtungen als Vorsichtsmaßnahmen wie

Wasserstoffsensoren und automatisch öffnende Dachluken, damit möglicherweise freigesetzter Wasserstoff entweichen kann (Explosionsschutz). Darüber hinaus sind Dacharbeitsstände, Spezialwerkzeuge, Diagnoseausrüstung und Persönliche Schutzausrüstungen vorzuhalten. Das Personal muss entsprechend des Umgangs und der Instandhaltung der Fahrzeuge geschult werden.

Je nach Umfang der individuellen Bestimmungen des Fahrzeugliefer- und -instandhaltungsvertrags mit dem Fahrzeughersteller können die jährlichen Instandhaltungskosten bei Bussen ca. 2 bis 6 % der Anschaffungskosten betragen. Die obere Grenze bildet dabei ein Full-Service-Vertrag ab.

6 Umgang mit Mehrkosten

Gegenüber dem Einsatz von Dieselnissen werden nach heutigem Stand nicht unerhebliche Mehrkosten durch die Umstellung auf Wasserstoffbusse entstehen. Investitionskosten (Fahrzeuge, Elektrolyse/Wasserstofftankstellen, Werkstattausrüstung/-umbauten) können ggf. durch passende Förderprogramme abgedeckt werden. Höhere Betriebskosten aufgrund der Energie- und Instandhaltungskosten des Wasserstoffbetriebs sind jedoch sehr wahrscheinlich auch in Zukunft nicht förderfähig. Diese wären durch höhere Bestellerentgelte über den Verkehrsdienstvertrag zwischen dem Busunternehmen und dem Aufgabenträger zu finanzieren.