REGIONALE KOOPERATION WESTKÜSTE

Regionale Kooperation Westküste

Machbarkeitsstudie

EINSATZ VON WASSERSTOFFBETRIEBENEN BUSSEN IN DEN KREISEN DITHMARSCHEN UND STEINBURG

Wir fördern Wirtschaft

EU.SH

Landesprogramm Wirtschaft: Gefördert durch die Europäische Union - Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), den Bund und das Land Schleswig-Holstein

Auftraggeberin:

Projektgesellschaft Norderelbe mbH
Regionalmanagement Regionale Kooperation Westküste
Viktoriastr. 17
25524 Itzehoe
Tel. 04821 17888-0

www.pg-norderelbe.de

Für die Regionale Kooperation Westküste

Kreis Dithmarschen
Kreis Nordfriesland
Kreis Pinneberg
Kreis Steinburg
Industrie- und Handelskammer Flensburg
Industrie- und Handelskammer zu Kiel
egeb: Wirtschaftsförderung
WEP Wirtschaftsförderungs- und Entwicklungsgesellschaft des Kreises Pinneberg mbH
Wirtschaftsförderungsgesellschaft Nordfriesland mbH

www.rk-westküste.de

Auftragnehmer:

BPV Consult GmbH
Löhrstraße 113
56068 Koblenz
Tel. 0261 201650-0

www.bpv-consult.de

April 2020 (Redaktionsschluss 15.02.2020)

Das Projekt wird finanziert mit Mitteln des Regionalbudgets Westküste 2017-2020 und durch die Kreise Dithmarschen und Steinburg. Das Regionalbudget Westküste wird gefördert aus dem Landesprogramm Wirtschaft.

Die Rechte für die Fotos bzw. Darstellungen auf dem Titelblatt liegen bei Nordlicht-Steinburg, Jens-Peter Mohr (Wasserstofftankstelle), Solaris Bus & Coach S.A. (Wasserstoffbus), BMWi (H_2- bzw. CO_2-Würfel), Fotalia (Windpark) sowie BPV Consult GmbH (Kartendarstellung).

Projektgesellschaft Norderelbe
Eine Gesellschaft der WEP und der egeb: Wirtschaftsförderung

Wir fördern Wirtschaft
EU.SH
Landesprogramm Wirtschaft: Gefördert durch die Europäische Union - Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), den Bund und das Land Schleswig-Holstein

Inhalt

Abbildungsverzeichnis 4
Tabellenverzeichnis 4
0 Kurzfassung 5
1 Einleitung 7
2 Technische Machbarkeit des Einsatzes von Wasserstoffbussen 8
2.1 Ausgangslage im ÖPNV und in der Wasserstofftechnologie 8
2.2 Abgrenzung und Definition des Umfangs der Studie 10
2.3 Energiebedarfsermittlung 10
2.4 Kurzfristige und mittelfristige Umstellungsmöglichkeiten 11
2.5 Dimensionierung der Wasserstoffinfrastruktur zur kompletten Umstellung 13
2.6 Grundanforderungen an Betriebshöfe und Werkstätten 15
2.7 Umwelteffekt 16
3 Organisatorische Voraussetzungen 18
3.1 Möglichkeiten der Kooperation mit dem Energiesektor 18
3.2 Umsetzungsplan 2040 19
3.3 Integrationsmöglichkeiten in bestehende Verkehrsverträge 20
3.4 Weiteres Vorgehen 22
4 Wirtschaftliche Betrachtung einer Umstellung 23
4.1 Fahrzeugkosten 23
4.2 Infrastrukturkosten für zusätzliche H_2-Tankstellen (ab Phase 3) 24
4.3 Bewertung der Fördermittel für Investitionen 25
4.4 Wirtschaftliches Entwicklungspotenzial 27
5 Konzept und Budget für die Umsetzung von Phase 1 28
Anlagen 1 bis 5: Kalkulationsparameter und Budgetierung der Kreise 30
Literaturverzeichnis 33

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Untersuchungsgebiet der Machbarkeitsstudie ... 8
Abb. 2: Wasserstoffinfrastruktur in der Region ... 9
Abb. 3: Einzugsgebiet der H_2-Tankstelle am Fritz-Thiedemann-Ring in Heide ... 12
Abb. 4: Distanz zwischen Linien und Tankstellen (bezogen auf die Endhaltestellen) ... 13
Abb. 5: Verbleibenden Energiebedarf nach mittelfristiger Umstellung ... 14
Abb. 6: Hocharbeitsstand ... 15
Abb. 7: Lastenkran ... 15
Abb. 8: Gefahrbehälter für Batterien (Quelle: Remondis) ... 16
Abb. 9: Umsetzungsplan Phasen 1 bis 3 (bis 2040) ... 19
Abb. 10: Mehrkosten Fahrzeugbetrieb im Vergleich zum Dieselbus (je Phase) ... 24
Abb. 11: Infrastrukturkosten der H_2-Tankstellen in 2 Varianten für Phase 3 ... 25
Abb. 12: Mehraufwand Investitionen Fahrzeugbeschaffung inkl. Fördermittel ... 26
Abb. 13: Investitionen H_2-Infrastruktur in 2 Varianten inkl. Fördermittel ... 26

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Energiebedarfsermittlung für 2 Antriebstechnologien ... 11
Tab. 2: Kurz- und mittelfristige Umstellungsstrategie ... 13
Tab. 3: Erforderliche H_2-Infrastruktur für eine komplette Umstellung aller Linien ... 14
Tab. 4: Dimensionierung H_2-Tankstellen für eine Komplettumstellung des ÖPNV ... 15
Tab. 5: CO_2-Einsparung einer Umstellung je Phase ... 16
Tab. 6: Annahme der verfügbaren H_2-Menge an ausgewählten Tankstellen ... 18
Tab. 7: Mengen und Leistungsgrößen der Kostenkalkulation (je Phase) ... 23
Tab. 8: Dimensionierung Projektbudget für Phase 1 – Pilotbetrieb ... 29

0 Kurzfassung

Die Studie „Einsatz von wasserstoffbetriebenen Bussen in den Kreisen Dithmarschen und Steinburg“ im Auftrag der Projektgesellschaft Norderelbe wurde in der Zeit von September 2019 bis Februar 2020 in enger Abstimmung mit den ÖPNV-Aufgabenträgern und den Verkehrsunternehmen erstellt. Gleichzeitig wurden die Vertreter der Wasserstoffwirtschaft intensiv mit eingebunden. Damit konnte die Machbarkeit der Einführung dieser neuen Technologie im ÖPNV der beiden Kreise im Detail geklärt werden.

Im Kapitel **Technische Machbarkeit des Einsatzes von Wasserstoffbussen** wurde zunächst festgestellt, dass mit den vorhandenen und in Planung befindlichen Wasserstofftankstellen in Brunsbüttel und Heide – anders als in vielen anderen Regionen in Deutschland – **sehr gute Ausgangsbedingungen** gegeben sind. Gleichzeitig ist langfristig der direkte Zugang zu Strom aus regenerativen Energiequellen (Windstrom) gegeben.

Für wasserstoffbetriebene Busse im ÖPNV gibt es keine betrieblichen Reichweitenbeschränkungen, aber der Zugang zu Tankmöglichkeiten ist von zentraler Bedeutung. Es wurde daher eine räumliche Bestands-, Linien- und Routinganalyse durchgeführt, um die kurz- und mittelfristigen Umstellungsmöglichkeiten je Linie im Einzelnen zu prüfen. Es wurde nachgewiesen, dass mittels der **3 bestehenden bzw. in Planung befindlichen Tankstellen** in den Phasen 1 (2021-2024) und 2 (2024-2028) ein zügiger Beginn der Umstellung möglich ist. Zusätzlich wurden **5 weitere Tankstellenstandorte** in zentraler Lage identifiziert, welche für die vollständige Umstellung in Phase 3 benötigt werden.

Zudem wurde für alle vorhandenen und noch zu planenden Tankstellen der H_2-Versorgungsbedarf für den ÖPNV im Einzelnen ermittelt. Demnach bewegt sich die **notwendige H_2-Menge** je Tankstelle in einer Bandbreite **von 350 bis 800 kg/Tag**.

Der **Nachweis des Umweltbeitrags** wurde auf Basis der eingesparten CO_2-Emissionen konkret für die Phasen 1 bis 3 ermittelt. Bei Vollumstellung würden demnach Emissionen in einem Äquivalent von **rd. 3.400 Diesel-PKW** eingespart.

Im Kapitel **Organisatorische Voraussetzungen** wurden dann die Möglichkeiten der **Kooperation mit dem Energiesektor** näher betrachtet. Im **Umsetzungsplan 2040** wurde auch die zeitliche Abfolge der Umstellung unter Berücksichtigung der für jedes ÖPNV-Linienbündel gegebenen Zeitfenster, jeweils bei Auslaufen eines Verkehrsvertrags, abgeleitet. Es wird dargelegt, dass ein zügiger Einstieg mit Umstellung einzelner Linien in Wasserstofftechnologie in Phase 1 mittels **Integration in gegebene Verkehrsverträge** möglich ist.

Im letzten Teilschritt wird das weitere Vorgehen dazu, auch unter Berücksichtigung der Erfordernisse zur Akquisition von Fördermitteln, näher erläutert. Dazu zählen die Einholung der notwendigen Beschlüsse und die Sicherung der Finanzierung, Ergänzungen zu den Verkehrsverträgen mit den heutigen ÖPNV-Betreibern, die Klärung der Fahrzeugbeschaffung (mit 3 Optionen), die vertragliche Regelung für Werkstatt- und Instandhaltungsarbeiten, die Regelung der Übernahme der Fahrzeuge durch Folgebetreiber sowie die Antragstellung auf Fördermittel beim Bund (BMVi bzw. NOW GmbH) für Phase 1.

Im Kapitel **Wirtschaftliche Betrachtung einer Umstellung** wird zunächst der Mehraufwand für die Fahrzeugkosten für die Fahrzeuganschaffung, für den Fahrzeugbetrieb (Energie) und für die Wartungs- und Instandhaltungskosten konkret benannt. In der mittelfristigen Perspektive sind – im Vergleich zum Dieselbus – unter den heute bekannten Bedingungen in etwa doppelt so hohe Fahrzeuggesamtkosten (ohne Personalkosten) für einen Brennstoffzellenbus (nach Abzug von Fördermitteln) zu erwarten.

Diese Mehrkosten resultieren zu einem nicht unerheblichen Anteil aus den Infrastrukturkosten für die Wasserstofftankstellen. Wenn diese einmaligen Kosten anfangs nur für den ÖPNV aufgewendet würden, müsste das Gesamtvolumen von rd. 37 Mio. € (ohne Fördermittel) bzw. von rd. 22,2 Mio. € (mit Fördermitteln) vollständig von den Aufgabenträgern getragen werden.

Des Weiteren wird das **wirtschaftliche Entwicklungspotenzial** für die Wasserstofftechnologie auf der Basis einer aktuellen Studie von Roland Berger bewertet. Demnach können schon bis 2030 die folgenden Kostensenkungspotenziale erwartet werden:

- Wasserstofftankstellen mit rd. 400 kg H_2/Tag: -20%
- Herstellungskosten mittels Elektrolyse: -50%
- Fahrzeugkosten ÖPNV-Betrieb: -30%

Diese Einschätzung wird im Wesentlichen damit begründet, dass nicht zuletzt im Nutzfahrzeugbereich deutliche Vorteile der Wasserstofftechnologie im Vergleich zu Batteriefahrzeugen wegen der nicht gegebenen Reichweitenbeschränkungen gegeben sind. Gerade auch bei der deutschen Automobilindustrie kann insofern ein entsprechend hohes Entwicklungsinteresse erwartet werden.

In einer **abschließenden Gesamtbewertung** stellen sich demnach die **Bedingungen für die Machbarkeit** der Umstellung des ÖPNV hin zu **wasserstoffbetriebenen Bussen** in den Kreisen Dithmarschen und Steinburg als **sehr gut** dar. Entscheidend für diese Bewertung ist der Tatbestand, dass mit der Nähe zu Windkraftanlagen ein dauerhaft sehr guter Zugang zu „grünem“ Wasserstoff gegeben ist, die notwendigen Tankstellen bereits errichtet wurden und eine Einpassung in den Linienbetrieb im ÖPNV-Angebot der beiden Kreise sehr gut möglich ist. Es sind damit alle wesentlichen Voraussetzungen für den Einstieg in den Einsatz von Wasserstoffbussen bereits vorhanden.

Es wurde daher ein **Lösungsvorschlag** für die **Umsetzung** entwickelt. Demnach stellt die Variante 2 für Phase 1 die Präferenzlösung der Gutachter mit einem Einstieg in den Wasserstoffbetrieb von gut 10% der ÖPNV-Gesamtleistung in beiden Kreisen dar; als kleinere Alternative würde sich Variante 1 mit Umstellung von rd. 5% der ÖPNV-Leistungen anbieten. Die **Eckpunkte** für einen **Pilotbetrieb** von 3 Jahren sind:

- Lösungsvorschlag/Präferenz: **Kreis Dithmarschen** und **Kreis Steinburg** mit der Tankstelle in **Brunsbüttel mit Kapazitätserhöhung**, mit **16 Bussen** sowie **775.000 Fpl-km** p.a.; **Budget: 9,8 Mio. €**.
- „Kleine“ Alternative: **Kreis Dithmarschen** und **Kreis Steinburg** und mit der **Tankstelle** in **Brunsbüttel ohne Kapazitätserhöhung** und **9 Bussen** sowie **380.000 Fpl-km** p.a.; **Budget: 5,2 Mio. €**.

Die Präferenz beruht darauf, dass die Umstellung von 16 Bussen eine deutlich größere Wahrnehmbarkeit und Signalwirkung hat. Zudem werden die Preise für die Bestellung der Fahrzeuge in dieser Menge günstiger sein als die Preise für die Beschaffung von nur 9 Bussen. Und alle einmaligen Projektkosten werden tendenziell in dieser Variante relativ günstiger ausfallen. Insofern hat die Kalkulation für den Lösungsvorschlag auch höhere Reserven.

1 Einleitung

Der Verkehrssektor zählt zu denjenigen Sektoren, die für Emissionen von Luftschadstoffen als besonders kritisch eingeschätzt werden müssen [1]. Vor diesem Hintergrund werden die Produktion und der Einsatz von jedweden Straßenfahrzeugen mit konventionellem Antrieb unter Verwendung von Verbrennungsmotoren grundlegend hinterfragt. Gleichzeitig strebt die Europäische Kommission eine gezielte Stärkung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebstechniken an, nicht zuletzt auch durch den Einsatz im ÖPNV. Letzteres wurde in Form einer gezielten Entwicklung mit der sog. Clean-Vehicle-Richtlinie [2] formal bestätigt.

Die Kreise Dithmarschen und Steinburg engagieren sich daher entsprechend den Zielsetzungen der der Norddeutschen Wasserstoffstrategie [3]. Diese basiert auch auf den entscheidenden Vorteilen der Küstenregionen, wie sie aus dem unmittelbaren Zugang zu erneuerbaren Energien, insbesondere aus Windkraft, resultieren. Damit ergeben sich bleibende Standortvorteile für die Regionen und für beide Kreise.

Schon bisher wurden die Projektinitiativen ENTREE100 und QUARREE100 in Heide sowie NEW 4.0 mit Wind2Gas und HySynGas in Brunsbüttel mit sichtbarem Erfolg entwickelt. Aus diesen Projektinitiativen entwickelten sich neue, eigenständige Initiativen aus der Region. Die im Ideenwettbewerb „Reallabore der Energiewende“ des Bundeswirtschaftsministeriums (BMWi) ausgewählten Vorhaben „Norddeutsche Reallabore“ und „ReWest100“ werden daher die Möglichkeiten der Wasserstoffnutzung in der Region weiter verbessern.

Die hiermit vorgelegte Machbarkeitsstudie wurde bei der BPV Consult GmbH im Spätsommer 2019 durch die Projektgesellschaft Norderelbe beauftragt. Sie folgt der Aufgabenstellung, den Einstieg in den Bereich Wasserstoff mit dem Einsatz von wasserstoffbetriebenen Bussen im ÖPNV in den Kreisen Dithmarschen und Steinburg konkret zu evaluieren. Die Bearbeitung erfolgte in der Zeit von September 2019 bis Februar 2020; sie wurde in einer Arbeitsgruppe mit Vertretern der Kreise und von Seiten der ÖPNV-Unternehmen intensiv abgestimmt.

Der Endbericht versteht sich als zusammenfassende Darstellung der Grundlagen und Ergebnisse und gliedert sich wie folgt:

- **Technische Machbarkeit des Einsatzes von Wasserstoffbussen** (Kap. 2), mit Betrachtung der ÖPNV-Ausgangslage und Abgrenzung des Umfangs der Studie, der Energiebedarfsermittlung, der Betrachtung der konkreten Umstellungsmöglichkeiten in 3 Phasen, der Dimensionierung der notwendigen Wasserstoffinfrastruktur, der Grundanforderungen an Betriebshöfe und Werkstätten sowie der Ableitung der der zu erwartenden Umwelteffekte;

- **Organisatorische Voraussetzungen** (Kap. 3), mit Evaluierung der Möglichkeiten der Kooperation mit dem Energiesektor, dem Umsetzungsplan 2040, den Integrationsmöglichkeiten in bestehende Verkehrsverträge und den Ausführungen zum weiteren Vorgehen;

- **Wirtschaftliche Betrachtung einer Umstellung** (Kap. 4), mit Beurteilung der Fahrzeugkosten, der Infrastrukturkosten für zusätzliche H_2-Tankstellen, der Bewertung der Fördermittel für Investitionen und des wirtschaftlichen Entwicklungspotenzials;

- **Konzept und Budget für den Einstieg in die Umsetzung** mit Zusammenführung der Ergebnisse in einem Lösungsvorschlag der Gutachter und einer Alternative dazu als „kleine“ Lösung.

Abschließend finden sich in **4 Anlagen** die verwendeten Parameter der Bedarfs- und Kostenkalkulationen und ein **Literaturverzeichnis**. Alle inhaltlichen Ausführungen haben den Redaktionsschluss 15.02.2020.

2 Technische Machbarkeit des Einsatzes von Wasserstoffbussen

2.1 Ausgangslage im ÖPNV und in der Wasserstofftechnologie

Die **Ausgangslage im ÖPNV** der Kreise Dithmarschen und Steinburg wird zunächst bestimmt vom Angebotsnetz der heutigen Linienverkehre. **Abbildung 1** zeigt das Untersuchungsgebiet mit den Linien, die farblich differenziert nach den Linienbündeln dargestellt sind. Der überwiegende Anteil der Linien ist kreisintern; je eine, jeweils lange Linie führt nach Rendsburg. Im Süden gibt es mehrere kürzere Linien in das Einzugsgebiet von Elmshorn (Kreis Pinneberg).

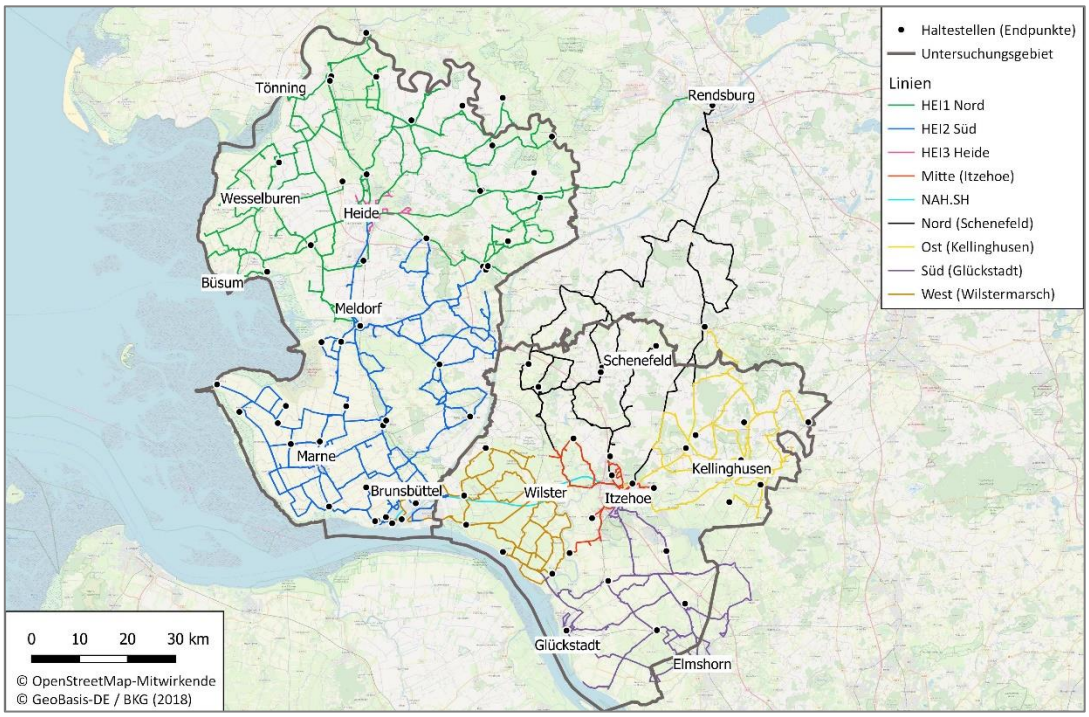

Abb. 1: Untersuchungsgebiet der Machbarkeitsstudie

Das Gesamtnetz umfasst 102 Linien mit 6 Betreibern (Stand: 2019). Von den 8 Linienbündeln liegen 2 große und ein kleineres Bündel in Dithmarschen und 5 kleinere im Kreis Steinburg. Das Leistungsvolumen am verkehrsstärksten Tag (Donnerstag zu Schulzeiten) beträgt 30.324 Fpl-km; das Gesamtvolumen umfasst rd. 7,5 Mio. Fpl-km pro Jahr (Stand: 2019).

Sowohl nach der Netzstruktur als auch nach den Volumina sind dies „übliche“ Gegebenheiten und Bedingungen des ÖPNV als Regionalbusverkehr mit 90 Linien; daneben gibt es 12 Linien in den Stadtverkehren von Heide, Itzehoe und Glücksstadt. Das Liniennetz hat 91 relevante Start- bzw. Endhaltestellen, wie sie für das Ein- und Aussetzen von Bussen mit alternativen Antrieben maßgeblich sind. Zum Einsatz kommen Standardlinienbusse (Solobusse, rd. 12 m Länge), Midi-Busse und Kleinbusse sowie einige ausgewählte Gelenkbusse (vorrangig im Schülerverkehr).

Die bedeutendsten Projektinitiativen im **Themenkomplex Wasserstoff** sind in Heide mit den Projekten ENTREE100 zur Errichtung von Power-to-X-Technologien und QUARREE100 zur Entwicklung eines Systems zur 100%-Energieversorgung aus erneuerbaren Energien angesiedelt. Innerhalb der 5jährigen Projektlaufzeit soll ein Elektrolyseur mit Strom aus Offshore-Windkraftanlagen und 30 MW Leistung in Betrieb gehen. Ebenfalls in 2021 ist die Inbetriebnahme einer Wasserstofftankstelle in Heide-Süd, Ausfahrt A23, mit Lieferung des Wasserstoffs via Pipeline für PKW und LKW (350 bar) geplant. Die Kapazität ist auf die Betankung von 60 LKW/Tag ausgelegt; weitere Treibstoffe sollen verfügbar sein. Angedacht ist zudem die Speicherung von Wasserstoff in einer Salzkaverne mit einem Volumen von 100.000 Tonnen (200 bar).

Eine 2. Tankstelle könnte in Heide am Fritz-Thiedemann-Ring für Wasserstoff umgerüstet werden; dazu ist ein Betreiberwechsel bereits in Planung. Bis 2027 könnten in Heide Elektrolyseure mit einer Gesamtleistung von ca. 700 MW realisiert werden. Davon sind rd. 50% für die Produktion von synthetischem Kerosin vorgesehen; zudem wird die Dekarbonisierung der Zementindustrie angestrebt [13].

Im Rahmen des Projekts „Norddeutsche EnergieWende 4.0“ (NEW 4.0) ist im Industrieraum Brunsbüttel als Wind2Gas-Anlage ein Elektrolyseur mit einer Leistung von 2,4 MW in Verbindung mit einem Windpark mit 15 MW Leistung zur Produktion von Wasserstoff mit einer Leistung von 40 kg/h von der Wind to Gas Energy GmbH & CO. KG etabliert worden. Ebenfalls in Brunsbüttel, auf dem Gelände der Covestro Deutschland AG, ist zudem eine Tankstelle der H2 Mobility Deutschland GmbH & Co. KG nunmehr in Betrieb, zunächst für PKW. Der dort nutzbare Speicher hat eine Kapazität von rd. 250 kg Wasserstoff [12].

Im gleichen Projektkontext soll in Brunsbüttel das großindustrielle Projekt „HySynGas“ zur Herstellung synthetischer Gase entstehen. Ein Konsortium von Arge Netz, MAN Energy Solutions und Vattenfall hat dazu Investitionen von rd. 130 Mio. € beschlossen, in deren Kontext auch ein weiterer Elektrolyseur mit 50 MW Leistung geplant ist. Damit finden sich in beiden Kreisen sehr gute Ausgangsbedingungen für die Umsetzung von Wasserstoffprojekten im Alltagsbetrieb des ÖPNV. **Abbildung 2** zeigt die Wasserstoffinfrastruktur im Projektumfeld.

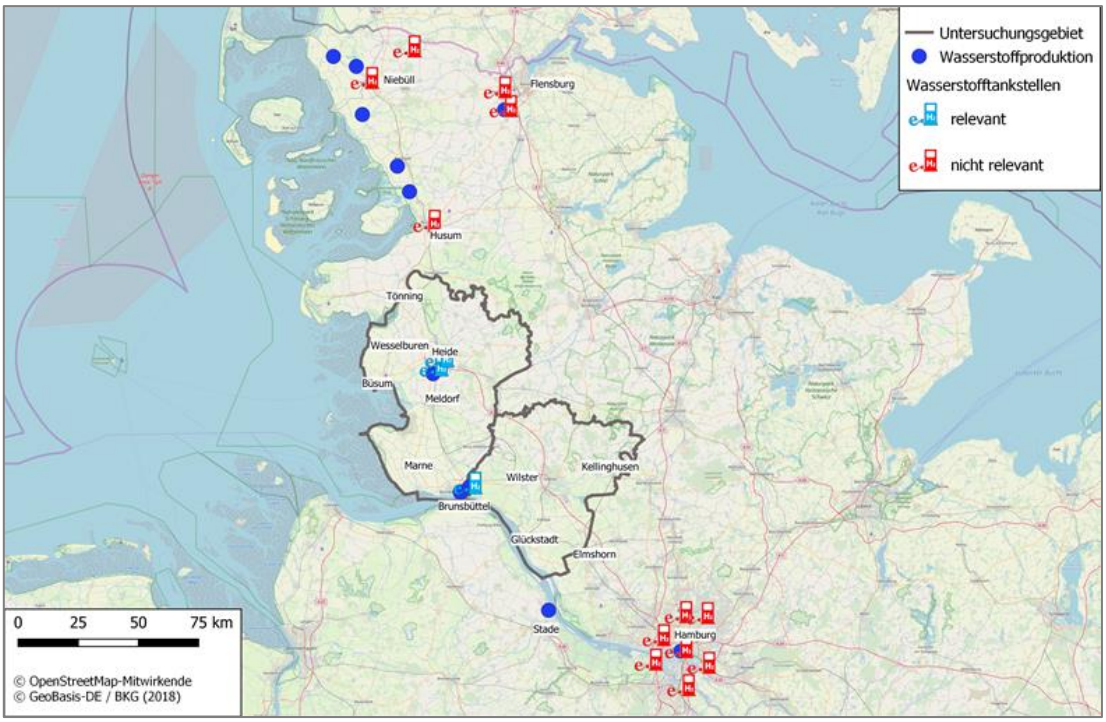

Abb. 2: Wasserstoffinfrastruktur in der Region

Der in **Abbildung 2** dargestellte Besatz mit Wasserstoffinfrastruktur muss als großer Vorteil für den möglichen Einsatz von wasserstoffbetriebenen Bussen in den Kreisen Dithmarschen und Steinburg bewertet werden; die Gründe stellen sich wie folgt dar:

- Von zentraler Bedeutung für den Einsatz von Wasserstoffantrieben ist der Zugang zu Wasserstofftankstellen und für diese wiederum ein kurzer Weg zur Wasserstoffherstellung. Denn für Wasserstoff gibt es heute kein Deutschland weites, regelmäßig vermaschtes Liefernetz, welches einen überall gleichwertigen Zugang zur Energie erlauben würde.

- Das ist auch der entscheidende Unterschied zum Einsatz von Dieselbussen (wie heute), weil Diesel uneingeschränkt und zu weitgehend gleichen Konditionen überall getankt und eingesetzt

werden kann. Zudem sind die Kosten dafür vergleichsweise günstig; die Technik ist robust und bewährt; das Netz ist voll ausgebaut.

- Es gibt aber auch einen entscheidenden Unterschied zum Elektroantrieb von Bussen. Denn auch Strom gibt es flächendeckend in Deutschland mit letztlich vergleichbarer Netzdichte. Im Unterschied zum Diesel wird man zwar vieler Orts entsprechende Ladeinfrastruktur bauen müssen, aber das Versorgungsnetzt selbst ist verfügbar.

Insofern ist für die Kreise Dithmarschen und Steinburg kein grundsätzliches Hemmnis im Vergleich zu Räumen ohne nahe gelegene Wasserstoffinfrastruktur gegeben. Der Wasserstoffantrieb im ÖPNV kann ausgehend von den genannten Tankmöglichkeiten geplant werden.

2.2 Abgrenzung und Definition des Umfangs der Studie

Gegenstand der Machbarkeitsstudie war ganz grundsätzlich der Einsatz von wasserstoffbetriebenen Bussen in beiden Kreisen. Im Regionalbusverkehr kommt regelmäßig eine ganze Reihe von Fahrzeugen mit kurzen und geteilten Umläufen ausschließlich für den Schülerverkehr zum Einsatz; die daraus resultierende, niedrige Umlaufleistung kann zu wirtschaftlich vertretbaren Bedingungen hohe Fahrzeuginvestitionen neuer Technologien kaum rechtfertigen. Daher wurden die Überlegungen zum Einsatz von wasserstoffbetriebenen Bussen auf die Regelverkehre mit ganzjähriger Bedienung konzentriert.

Als maßgeblich für den verkehrsstärksten Tag (Donnerstag zu Schulzeiten, 12.09.2019) wurden die Fahrplandaten der NAH.SH gewählt. Zudem standen alle notwendigen, allgemeinen Informationen und technische Daten über die aktuellen bzw. geplanten Tankstellen zur Verfügung. Das Betriebsgeschehen und alle Anforderungen an den Einsatz der Fahrzeuge im ÖPNV wird von den entsprechenden Umlaufplänen bestimmt. Diese waren jedoch seitens der Betreiber nicht bereitgestellt worden, ebenso wenig wie Informationen über die Betriebshöfe. Ersatzweise erfolgte eine Bewertung der Nutzfahrten auf Basis der Fahrplandaten unter Annahme des Fahrzeugeinsatzes immer an den Linienendpunkten in Verbindung mit einer Schätzung der Leerfahrten und des korrespondierenden Fahrzeugbedarfs.

Die so ermittelten Kennzahlen für die Wagenkilometer und Fahrzeug und Tag und die Jahreslaufleistung je Fahrzeug konnten als hoch plausibel im Ergebnis bewertet werden. Zudem ließ sich eine sinnvolle und betrieblich machbare Zuordnung von konkreten Linien zum Einsatz von Bussen mit Wasserstoffantrieb entwickeln. Damit standen im Ergebnis praxistaugliche Eckpunkte und Kalkulationsgrundlagen für die Energiebedarfsermittlung bereit.

2.3 Energiebedarfsermittlung

Wesentlich für die Energiebedarfsermittlung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebstechniken sind zwei Inputgrößen:

- Zum einen verlässliche Daten über die Laufleistung der Fahrzeuge in einem konkreten betrieblichen Kontext; dies war mit dem dargestellten Vorgehen sichergestellt;
- Zum anderen belastbare Grundlagen für Energiebedarf der Fahrzeuge inkl. Reserven für einen verlässlichen Betrieb; dazu wurde auf entsprechende Kennwerte, wie sie in der Literatur veröffentlich sind, zurückgegriffen [4][5] (vgl. **Anlage 1**).

Durch dieses Vorgehen wurde gewährleistet, dass im Zweifel der kalkulierte Energiebedarf eher zu hoch als zu niedrig abgeschätzt wurde; der Fahrzeugeinsatz hat damit schon eine direkt inkludierte, rechnerische Reserve. Er hat aber auch eine indirekte, weitere Reserve, weil die technologischen Fortschritte in der Energieeffizienz der noch sehr jungen Antriebstechnologien nicht berücksichtigt wurden. Denn in der Praxis bzw. mit dem Hochlaufen des gewerblichen Einsatzes entsprechender Fahrzeuge im Regelbetrieb wird es die adressierten Verbesserungen in Bezug auf den Energieverbrauch geben.

Teilnetze	Anzahl Linien	Energieverbrauch (kg H_2/Tag)			
		BZ-Busse		H_2-Motor	
		Min	Max	Min	Max
Alle Linien	**102**	**3.658**	**3.951**	**4.181**	**4.516**
HEI1 Nord	30	1.043	1.130	1192	1.292
HEI2 Süd	24	852	923	974	1.055
HEI3 Heide	4	61	64	70	73
Mitte (Itzehoe)	6	331	350	378	400
Nord (Schenefeld)	7	321	348	367	397
Süd (Glückstadt)	13	423	457	484	523
West (Wilstermarsch)	10	228	247	261	283
Ost (Kellinghusen)	7	238	258	272	295

Tab. 1: Energiebedarfsermittlung für 2 Antriebstechnologien

In **Tabelle 1** finden sich die Ergebnisse für den Energiebedarf im Vergleich von 2 Antriebstechnologien auf der Basis von Wasserstoff (ohne die Linie 6600 mit Verantwortlichkeit der NAH.SH):

- Brennstoffzellenbusse (BZ-Busse), welche den Wasserstoff mit einer gesonderten Motorentechnik optimal verwerten;
- Wasserstoffmotoren (H2-Motor), welcher den Wasserstoff in einem umgebauten konventionellen Motor verbrennen.

Die Unterschiede in der Effizienz des Energieverbrauchs sind unmittelbar in den Ergebnissen ersichtlich; der Einsatz von Wasserstoffmotoren hat einen um 14% höheren Energiebedarf. Während Brennstoffzellenbusse auf dem Markt verfügbar sind, laufen Wasserstoffmotoren bis dato nur auf Versuchsständen (Stand: Februar 2020).

2.4 Kurzfristige und mittelfristige Umstellungsmöglichkeiten

Da Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb auf dem Markt ganz allgemein verfügbar sind und auch Wasserstofftankstellen in den Kreisen Dithmarschen und Steinburg gegeben sind bzw. kurzfristig gegeben sein werden, gibt es keine grundsätzlichen Hindernisse einer Umstellung des ÖPNV auf diese Antriebstechnik. Damit stellt sich jedoch die Frage, wie eine solche Umstellung ganz konkret vollzogen werden könnte.

Die Möglichkeiten dafür sind in einer **Methodik der räumlichen Analyse** der bestehenden Infrastruktur in Verbindung mit den realen betrieblichen Gegebenheiten bei den Verkehrsunternehmen systematisch wie folgt abgeleitet worden:

- **Bestandsanalyse** von Infrastruktur, bestehenden Tankstellen und Linienverläufen
- **Linienanalyse** nach Start- und Endhaltestellen und Energiebedarf
- **Routinganalyse** geeigneter Betriebspunkte zu den Tankstellen.

Folgende Annahmen wurden bei den Analysen verwendet:

- Die Analysen basieren auf der Betrachtung der einzelnen Linien.
- Es werden die jeweils verfügbaren bzw. geplanten Tankstellen genutzt.

- Die Fahrzeit zur nächsten Tankstelle beträgt max. 20 Minuten (Nutzfahrzeuge), weil längere Wege zu viel Zeit und Personalaufwand kosten würden.
- Die Endhaltestellen werden an den Verknüpfungspunkten der Linien mit den Tankstellen angelegt.
- Planerisch wurden alle Linien mit allen Endhaltestellen kombiniert. Sobald eine der Endhaltestellen einer Linie im Erschließungsgebiet einer Tankstelle lag, wurde diese Linie als „erschlossen“ definiert.

In **Abbildung 3** findet sich exemplarisch das Einzugsgebiet der Wasserstofftankstelle am Fritz-Thiedemann-Ring in Heide. Es wird von der 20-Minuten-Isochrone mit Start an der Tankstelle eingegrenzt: Alle Punkte, die in der farbig angelegten Fläche liegen, haben eine Fahrzeit zur Tankstelle von max. 20 Minuten.

Die differenzierte Geometrie des Einzugsgebiets wird von der Dichte des Straßennetzes und der Ausrichtung der schnell zu befahrenden Straßen bestimmt; die räumliche Erstreckung des Einzugsbereichs ist damit entlang gerade geführter Hauptstraßen am größten. In dem so abgegrenzten Einzugsgebiet der Tankstelle am Fritz-Thiedemann-Ring in Heide liegen 10 Haltestellen, die 27 potenzielle H_2-Linien einfach (1 Endhaltestelle) und 7 Linien mit beiden Endhaltestellen anbinden. Für die anderen Tankstellen wurde gleichermaßen verfahren.

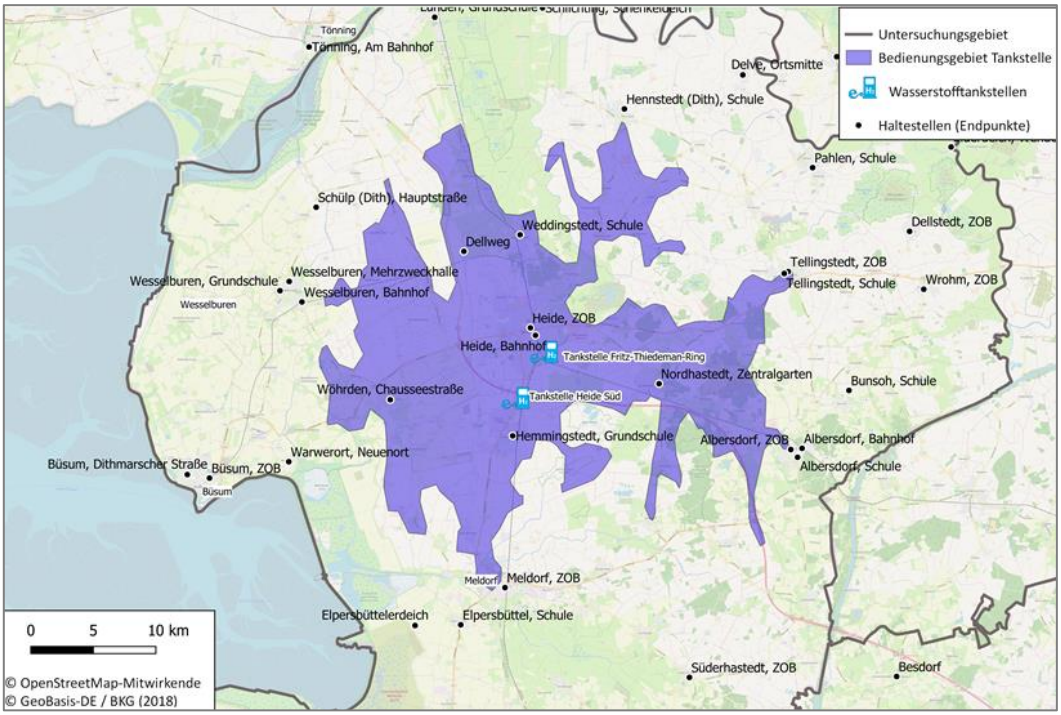

Abb. 3: Einzugsgebiet der H_2-Tankstelle am Fritz-Thiedemann-Ring in Heide

Nach diesem Ansatz sind alle Linien in beiden Kreisen analysiert und in **Abbildung 4** dargestellt worden. Die Reihung von links nach rechts richtet sich nach der mittleren Entfernung (in Minuten) je Linie. Die zugehörigen Liniennummern sind ausgewiesen, jedoch aus Gründen der besseren Darstellung nur in jedem 2. Fall. Von den potenziell erreichbaren Linien liegen 27 Linien mit beiden Endhaltestellen im Bedienungsgebiet einer Tankstelle; damit ist dort eine betrieblich hoch flexible Tankplanung im Alltagsbetrieb möglich. Der rote Kasten umfasst alle Linien, die nicht mit beiden Enden innerhalb der Akzeptanzgrenze von 20 Minuten liegen.

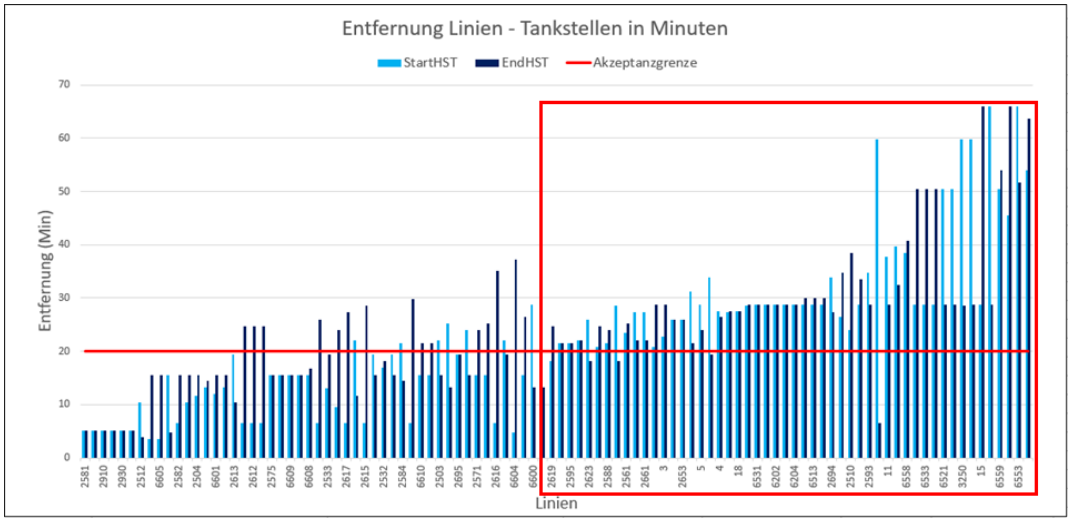

Abb. 4: Distanz zwischen Linien und Tankstellen (bezogen auf die Endhaltestellen)

Im nächsten Teilschritt wurde der Energiebedarf der fahrbaren Linien mit der verfügbaren Wasserstoffmenge an den jeweiligen Tankstellen abgeglichen. Im Ergebnis wurde festgestellt, welche Linien kurzfristig und mittelfristig umgestellt werden können (vgl. **Tabelle 2**). Für die kurzfristige Umstellung (Phase 1) gibt es 2 Varianten, jeweils unter Nutzung der gegebenen Tankstelle in Brunsbüttel (200 kg nutzbare Menge): Var. 1 ohne Kapazitätserhöhung, Var. 2 mit Kapazitätserhöhung auf 400 kg/Tag. Phase 2 berücksichtigt die Nutzung der beiden Tankstellen in Heide zusätzlich mit 2 Mal 360 kg/Tag zuzüglich der Kapazität von 400 kg/Tag in Brunsbüttel.

	Phase 1 – Var. 1	Phase 1 – Var. 2	Phase 2
Zeitbezug	kurzfristig, in den nächsten 3 Jahren	kurzfristig, in den nächsten 3 Jahren	3 bis 7 Jahre
Linienbezug	**1,5 Linien**: IZ: L 6606 HEI: 33% L 258X (neu) [1)]	**3 Linien:** IZ: L 6602 + L 6606 HEI: 100% L 258X (neu)	100%-Umstellung von **15 Linien**

[1)] Umstellung **einer** Linie aus zukünftiger Linienstruktur der Linien L258X (derzeit noch 3 Linien)

Tab. 2: Kurz- und mittelfristige Umstellungsstrategie

Mit der genannten Wasserstoffmenge je Tag von 1.120 kg/Tag und unter Berücksichtigung der in jedem Tankstelleneinzugsbereich liegenden Linien ist dann eine konkrete Zuordnung von Linien je Tankstelle erfolgt. Demnach können mit diesen Tankstellen 15 Linien betrieblich sicher vollständig auf Wasserstoffantrieb im genannten Zeitraum umgestellt werden. Dabei sind (reine) Schülerlinien wg. der geringen Laufleistung nicht berücksichtigt worden.

2.5 Dimensionierung der Wasserstoffinfrastruktur zur kompletten Umstellung

Zur Dimensionierung der notwendigen Wasserstoffinfrastruktur bei kompletter Umstellung war dann eine weitere Bilanzierung des Energiebedarfs, nunmehr nach Abschluss der „mittelfristigen Umstellung“ notwendig, da die vorgesehenen 15 Linien dauerhaft die entsprechenden Kapazitäten belegen werden.

Abbildung 5 zeigt den für eine Voll-Umstellung verbleibenden Energiebedarf nach „mittelfristiger Umstellung“ mit der Lage der jeweiligen Endhaltestellen. Die Linien sind dabei den gegebenen Linienbündeln in unterschiedlichen Farben zugeordnet; die zuvor schon umgestellten Linien und deren Bedarf ist nicht dargestellt. Im Ergebnis wird deutlich, dass der weitergehende Bedarf insbesondere in den größeren Städten zu erwarten ist, weil sich dort die meisten Linienenden gut mit zentral gelegenen Tankstellen kombinieren lassen. Auch an den außerhalb liegenden Standorten Rendsburg und Elmshorn ist im Endausbau ein Bedarf einzuplanen.

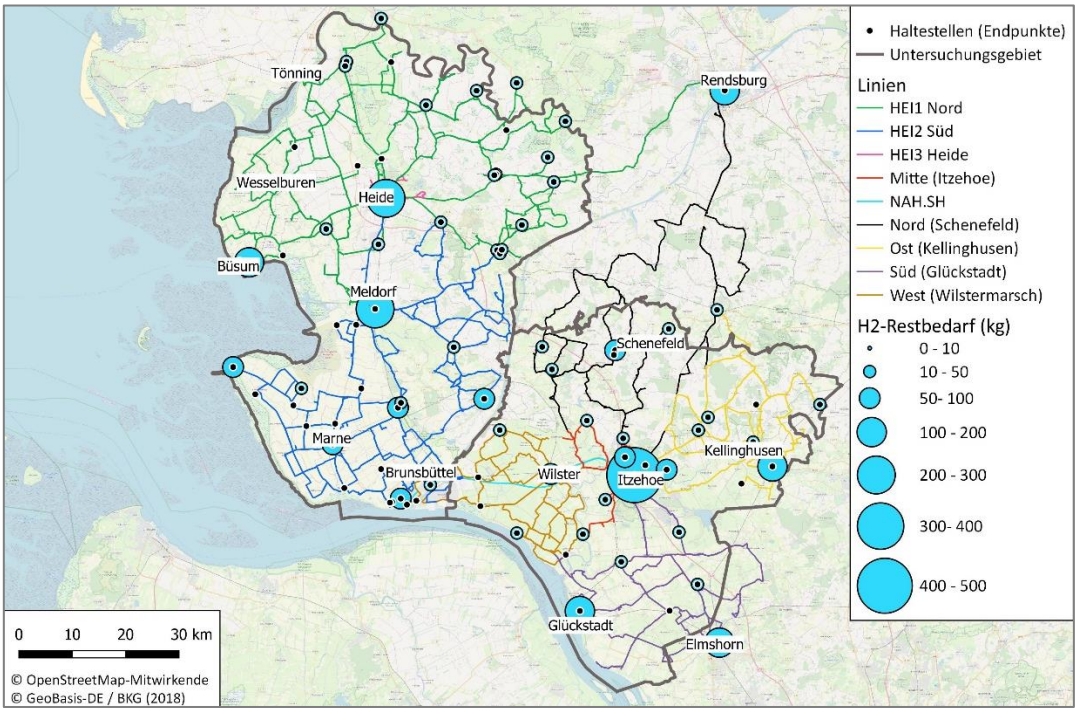

Abb. 5: Verbleibenden Energiebedarf nach mittelfristiger Umstellung

Damit konnten Vorgaben für die Planung von neuen Tankstellen definiert werden. Diese wurden in zentraler Lage an großen Orten gewählt, um die Anzahl zu minimieren und je Tankstelle möglichst viele Fahrzeuge laden zu können. **Tabelle 3** zeigt die Dimensionierung mit dem geplanten, verfügbaren Angebot (links) und dem Versorgungsbedarf (rechts), differenziert nach Antriebstechnik und dem Minimal- und Maximalbedarf für die jeweils notwendige Tankstellenzusatzkapazität.

Status	Tankstelle	H_2-Menge verfügbar (kg/Tag)	H_2-Bedarf BZ (kg/Tag)		H_2-Bedarf H_2-Motor (kg/Tag)	
			Min	Max	Min	Max
in Betrieb	Brunsbüttel	400	322	349	368	398
in Planung	Heide Süd	360	290	315	332	360
	Fritz-Thiedemann-Ring	360	291	313	332	358
ermittelter Bedarf	Heide 3	750	623	675	712	771
	Meldorf	750	600	650	686	743
	Itzehoe 1	800	640	692	731	790
	Itzehoe 2	800	643	690	735	789
	Glückstadt	350	249	269	285	307

Tab. 3: Erforderliche H_2-Infrastruktur für eine komplette Umstellung aller Linien

In allen Fällen ist aber hier zunächst „nur“ der jeweilige Tagesbedarf am stärksten Betriebstag abgebildet worden; auf dieser Basis kann jedoch die Tankstelleninfrastruktur nicht dimensioniert werden. Es sind zusätzlich Annahmen über andere H2-Bedarfe an den Tankstellen notwendig sowie zu einer Speicherkapazität, um Unregelmäßigkeiten bei der Nachfrage und/oder der Wasserstoffanlieferung ausgleichen zu können. Letzteres wäre nicht nötig, wenn die Versorgung über ein Rohrleitungsnetz realisiert würde. In die Ermittlung der technischen Daten für die komplette Umstellung sind folgende Annahmen und Parameter eingeflossen:

- Die Standorte sind in den benannten Ortslagen angenommen, aber kleinräumig noch nicht fixiert.

- Es wird eine Inanspruchnahme von 50% des dort verfügbaren Wasserstoffs durch den Tankbedarf im ÖPNV unterstellt.
- Es wird nach den Empfehlungen der NOW eine 2-Tages-Reserve als guter Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit unterstellt.

2-Tages-Reserve	Heide 3	Meldorf	Itzehoe 1	Itzehoe 2	Glückstadt	Gesamt
Speicherkapazität an der Tankstelle (kg)	1.300 - 1.600	1.200 - 1.500	1.300 - 1.600	1.300 - 1.600	500 - 700	**5.600 - 7.000**
Anteil H_2 verfügbar (%) für den ÖPNV	50	50	50	50	50	**50**
verfügbare Wasserstoffmenge für den ÖPNV (kg/Tag)	650 - 800	600 - 750	650 - 800	650 - 800	250 - 350	**2.800 - 3.500**
Anzahl Speichertanks (bis 400 kg pro Tank)	3 bis 4	3 bis 4	4	4	2	**17 - 18**
Anzahl Anlieferungen/Tag (Fall Zulieferung von H_2)	1	1	1	1	1	**5**
Kapazität Elektrolyseur (kg/Tag) (bei eigener H_2-Produktion)	650 - 800	600 - 750	650 - 800	650 - 800	250 - 350	**2.800 - 3.500**

Tab. 4: Dimensionierung H_2-Tankstellen für eine Komplettumstellung des ÖPNV

Die Ergebnisse und Kennzahlen der technischen Ausstattung für die zusätzlich nötigen Tankstellen bei kompletter Umstellung des ÖPNV zeigt **Tabelle 4**. Dabei wird an den Tankstellen eine Speicherkapazität von bis zu 1.600 kg unterstellt. Eine solche Speicherkapazität erscheint in der hier anzunehmenden Zeit der Umsetzung (nach 2027) realistisch.

2.6 Grundanforderungen an Betriebshöfe und Werkstätten

Wenn und soweit im Busbetrieb wasserstoffbetriebene Fahrzeuge eingesetzt werden, ist zunächst von zentraler Bedeutung, dass damit Hocharbeitsplätze in den Betriebshöfen bzw. Werkstätten zwingend benötigt werden. Denn es ist davon auszugehen, dass die Wasserstofftanks dauerhaft auf dem Fahrzeugdach angeordnet werden. Da dies Hochdrucktanks sind, müssen diese entsprechend druckfest konstruiert werden und sind dementsprechend schwer. Aus diesem Tatbestand resultieren die folgenden Grundanforderungen:

- Einrichtung von Hocharbeitsplätzen inkl. Absturzsicherung
- Hebevorrichtungen für die Tanks bzw. Lastenkräne
- Hallenhöhe von 4,50 m (Minimum) bis ca. 8,00 m (komfortabel)

Die baulichen Voraussetzungen müssen dauerhaft und entsprechend verlässlich gegeben sein. Mobile Lösungen z. B. für die Hocharbeitsplätze können nur als Provisorien betrachtet werden. In den nachfolgenden **Abbildungen 6 und 7** sind die Erfordernisse an konkreten Beispielen aus der Praxis visualisiert.

Abb. 6: Hocharbeitsstand
(Quelle: Verwaltungs-Berufsgenossenschaft)

Abb. 7: Lastenkran
(Quelle: Fahrzeugwerkstätten Falkenried)

Diese baulichen Anpassungen sind nur die augenfälligsten und anspruchsvollsten Änderungen, die notwendig sind. Es ergeben sich aber weitere Anpassungserfordernisse in Bezug auf die Batterielagerung, auf die Raumausstattung und bei den benötigten Arbeitsmitteln:

Abb. 8: Gefahrbehälter für Batterien (Quelle: Remondis)

- **Batterielagerung** (für Brennstoffzellenfahrzeuge): Bedarf eines kühlen, trockenen und gut gelüfteten Orts, getrennt von brennbaren Materialien zzgl. Gefahrbehältern für die Lagerung und den Transport von beschädigten Batterien (vgl. **Abbildung 8**);
- **Raumausstattung**: Lüftungseinrichtungen und Wasserstoffsensoren sowie ATEX-Einrichtungen (Atmosphères explosives), also Geräte, Komponenten und Schutzsysteme für die Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (z. B. Dachluken, die sich im Fall einer Wasserstofffreisetzung automatisch öffnen müssen);
- **Arbeitsmittel**: Messgeräte (z. B. Spannungsprüfer, Wasserstoffleck-Detektoren), isolierte Werkzeuge (Spannungen bis 1.000 V) und persönliche Schutzausrüstungen (z. B. Schutzhandschuhe, Augen- und Gesichtsschutz).

Schließlich ist darauf hinzuweisen, dass damit auch umfangreiche Erfordernisse der Weiterbildung der Werkstattpersonale und der Schulung und Einweisung der Fahrpersonale einhergehen. Da es dafür mittlerweile Standards gibt, sind dies operative Erfordernisse, aber längst keine grundsätzlichen Hindernisse einer Umstellung des ÖPNV-Betriebs auf Busse mit Wasserstoffantrieb.

2.7 Umwelteffekt

Die Abschätzung der Umwelteffekte, wie sie sich aus der Umstellung von Dieselbussen auf den Einsatz von Bussen mit Wasserstoffantrieb (Brennstoffzelle oder Wasserstoffmotor) ergeben, sind für die CO_2-Emissionen konkret ermittelt worden. Die Grundlagen dafür finden sich in **Anlage 2**. Wie dort dargelegt ist, beruhen die Abschätzungen auf 4 Quellen [5][6][7][8], sodass eine belastbare Grundlage dafür gegeben ist.

Zeitbezug Umsetzung	kurzfristig V1		kurzfristig V2		mittelfristig		langfristig	
Energiebedarfsannahme	**Min**	**Max**	**Min**	**Max**	**Min**	**Max**	**Min**	**Max**
CO_2-Einsparung pro Tag (Do) ggü. Diesel (kg)	2.030	2.207	4.074	4.429	10.968	11.890	44.312	44.312
CO_2-Einsparung pro Jahr ggü. Diesel (t)	568	617	1.162	1.263	3.224	3.496	10.925	11.836
Diesel-PKW-Äquivalent/Jahr*)	163	177	334	442	927	1.005	3.139	3.401

*) PKW-Äquivalent: VW Passat 1.6 TDI

Tab. 5: CO_2-Einsparung einer Umstellung je Phase

Die Ergebnisse zeigt **Tabelle 5**. Die Gesamteinsparung an CO_2-Emissionen beträgt demnach im langfristigen Horizont rd. 11.400 Tonnen CO_2 pro Jahr (als Mittelwert von Minimal- und Maximalverbrauch). Es wurde zudem eine Umrechnung in ein PKW-Äquivalent vollzogen, welches als einfach nachvollziehbarer Größe verstanden werden kann. Im langfristigen Horizont entspricht die Einsparung nach dieser

Betrachtung denjenigen CO_2-Emissionen, wie sie heute von 3.139 bis 3.401 PKW pro Jahr im Regelbetrieb generiert werden.

Würde also der ÖPNV-Betrieb in den Kreisen Dithmarschen und Steinburg in der genannten Systematik auf wasserstoffbetriebene Busse umgestellt, entspräche dies bei den CO_2-Emissionen der Stilllegung von rd. 3.250 PKW-Äquivalenten in beiden Kreisen (in Summe).

3 Organisatorische Voraussetzungen

3.1 Möglichkeiten der Kooperation mit dem Energiesektor

Im Rahmen der Analyse der organisatorischen Voraussetzungen zum Einsatz von wasserstoffbetriebenen Bussen im ÖPNV der Kreise Dithmarschen und Steinburg wurden zunächst die Möglichkeiten der Kooperation mit dem Energiesektor in Bezug auf die Wasserstoffbereitstellung untersucht. Diese Betrachtung ist notwendig, weil es bis heute – anders als bei der Diesel- und Stromversorgung – noch keine etablierte und flächendeckende Versorgung mit Wasserstoff gibt. Eine verlässliche Versorgung ist jedoch zwingend für einen erfolgreichen Regelbetrieb im ÖPNV.

Dazu wurden sowohl die Tankstellen als auch die Produktionsorte in beiden Kreisen sowie im näheren regionalen Umfeld betrachtet. Wie bereits zuvor dargestellt, stellen sich die Grundvoraussetzungen, also die grundsätzliche Verfügbarkeit, sehr gut dar. Betrachtet wurden demnach die Möglichkeiten der Kooperation ganz konkret und je Standort. Die Möglichkeit der Nutzung bestehender bzw. in Planung befindlicher Tankstellen ist gegeben in:

- Tankstelle Brunsbüttel
- Tankstelle Heide Süd
- Tankstelle Fritz-Thiedemann-Ring (Heide).

Mit Inbetriebnahme der Wasserstoffbusse müssen die Betreiber langfristig verlässliche Versorgungsverträge abschließen. Alternativ können Anlagen zur Produktion von Wasserstoff gekauft werden bzw. Kontingente der dortigen Produktion. Das gilt zunächst für den Elektrolyseur an der Raffinerie Heide (Reallabor Westküste 100). Weitere Tankstellen und Wasserstoffproduktionsstellen werden in Zukunft mit großer Wahrscheinlichkeit in beiden Kreisen errichtet.

Die daraus resultierenden Möglichkeiten können auch zukünftig in das Gesamtkonzept einbezogen werden, da sie beiden Seiten Vorteile bringen (Versorgungssicherheit vs. Absatzsicherung). **Tabelle 6** zeigt die Annahmen zur Verfügbarkeit der H_2-Mengen an den ausgewählten Haltestellen als vorläufige Plangrößen.

Status	Tankstelle	H_2-Menge nutzbar an der Tankstelle (kg)	Anteil H_2 verfügbar (%)	H_2-Menge zur Verfügung (kg/Tag)
in Betrieb	Brunsbüttel	500	80	400
in Planung	Heide Süd	1.800	20	360
	Fritz-Thiedemann-Ring	1.800	20	360
ermittelter Bedarf	Heide 3	1.500	50	750
	Meldorf	1.500	50	750
	Itzehoe 1	1.600	50	800
	Itzehoe 2	1.600	50	800
	Glückstadt	700	50	350

Tab. 6: Annahme der verfügbaren H_2-Menge an ausgewählten Tankstellen

In der Konkretisierung der Zusammenarbeit bieten sich 2 betriebliche und ökonomische Sicherungselemente an:

- **Reservierung einer Zapfsäule** ausschließlich für den ÖPNV-Betrieb, sodass keine Wartezeiten in den Busbetrieb eingeplant werden müssen;

- **Reservierung einer H_2-Menge** pro Tag, die dem ÖPNV-Betrieb garantiert wird, dieser aber auch verpflichtend abnehmen muss.

Die konkreten Bedarfe und Volumina der Reservierung werden auch bestimmt von Wasserstoffbedarf anderer Wasserstoffnutzungen im Einzugsgebiet der jeweiligen Tankstelle. Die Festlegungen dazu sind demnach konkret im Einzelfall zu planen und vertraglich zu fixieren. Bedeutsam für beide Seiten ist der Tatbestand, dass der ÖPNV-Betrieb solche Verträge dauerhaft zwingend benötigt, um sicheren Fahrbetrieb garantieren zu können. Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass eine Vollumstellung in sukzessiver Abfolge und abgestimmt auf die Weiterentwicklung der Wasserstofftankstellen in beiden Kreisen gut möglich ist.

3.2 Umsetzungsplan 2040

Wenn nun beide Kreise die Umstellung des ÖPNV auf wasserstoffbetriebene Busse planen, so muss das nicht nur technisch-betrieblich sinnvoll und machbar sein; es ist herausgearbeitet worden, dass es diesbezüglich keine grundsätzlichen Restriktionen gibt und gute Ausgangsbedingungen gegeben sind.

Der Umsetzungsplan wird aber auch von anderen Herausforderungen bestimmt, wie sie sich aus der Tatsache ergeben, dass der ÖPNV in beiden Kreisen auf der Grundlage von Verkehrsverträgen mit Verkehrsunternehmen erbracht wird. Die dazu notwendigen Verträge werden EU-weit ausgeschrieben und im Regelfall über Laufzeiten von 8 bis 10 Jahren vergeben. Zudem sind alle in Rede stehenden Verkehre heute unter Vertrags. Die Umstellung kann insofern am einfachsten erfolgen, wenn jeweils mit Auslaufen eines bestehenden Verkehrsvertrags und Fixierung eines neuen Vertrags auf Wasserstoffbetrieb umgestellt wird.

Unter Berücksichtigung der aktuellen Laufzeiten der bestehenden Verträge je Linienbündel ergibt sich der in der nachfolgenden **Abbildung 9** dargestellte Umsetzungsplan (bis 2040). In grün hinterlegten Hinweisen unter der Zeitleiste sind die Zeitpunkte benannt, zu denen eine Neuvergabe wirksam wird. Blau hinterlegt sind die Hinweise zu den Zeitpunkten und Orten, an denen die jeweils benötigte Tankstelleninfrastruktur entsprechend ausgeweitet werden muss. Darunter finden sich die linienweise die Zeitbalken je Vertrag bzw. Linienbündel inkl. den Leistungen im Auftrag der NAH.SH.

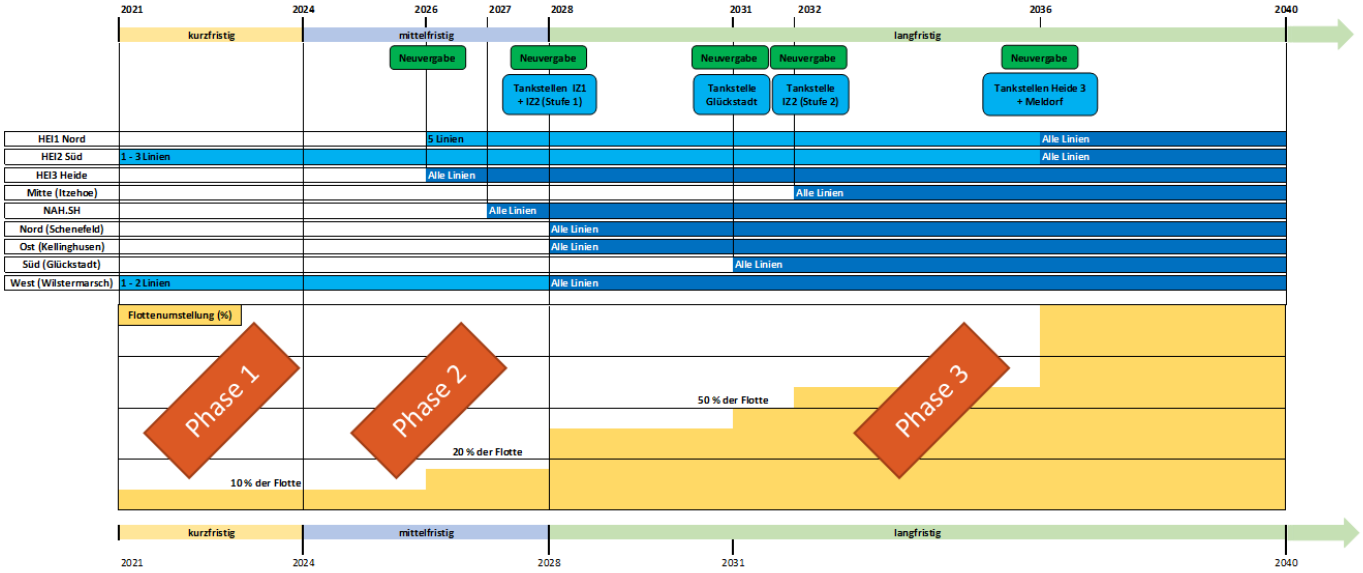

Abb. 9: Umsetzungsplan Phasen 1 bis 3 (bis 2040)

Wie bereits herausgearbeitet können die ersten Linien der beiden Linienbündel 2021 umgestellt werden (**Phase 1**: HEI2 Süd und IZ West Wilstermarsch). Von 2026 bis 2028, in **Phase 2**, folgen dann 5 Linien im Linienbündel HEI1 Nord sowie alle Linien im Linienbündel HEI3 Heide. Ab 2027 könnte dann auch die im Auftrag der NAH.SH betriebene Linie 6600 umgestellt werden.

Phase 3 beginnt dann im Jahr 2028 mit der Umstellung von allen Linien der Linienbündel Nord (Schenefeld) und Ost (Kellinghusen) und wird 2031 mit der Umstellung von Linienbündel Süd (Glückstadt) fortgesetzt. Die Umstellung wird nach diesem Plan im Jahr 2032 mit Umstellung des Linienbündels Mitte (Itzehoe) fast vervollständigt. Der Abschluss folgt 2036, wenn die noch fehlenden Linien der Linienbündel HEI1 Nord und HEI2 Süd ebenfalls auf wasserstoffbetriebene Fahrzeuge umgestellt werden.

Diese Planung macht deutlich, dass eine koordinierte Umstellung von Linienbetrieb und Wasserstofftankstellen schrittweise möglich ist. Damit kann die Planung als hochgradig realistisch bewertet werden. Zudem kann die Umsetzung „Schritt für Schritt“ realisiert werden.

3.3 Integrationsmöglichkeiten in bestehende Verkehrsverträge

Im Zuge der Prüfung der organisatorischen Voraussetzungen sind auch die Integrationsmöglichkeiten in bestehende Verkehrsverträge (bis 2023) betrachtet worden. Dabei war zu verifizieren, ob und inwieweit in einem laufenden Vertrag eine solche Umstellung möglich ist.

Wesentliches Problem ist dem Grundsatz nach, dass die laufenden Verträge im Wettbewerb vergeben wurden und in dem dazu vorab durchgeführten Wettbewerbsverfahren die Einführung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben nicht vorgesehen war. Insofern gibt es aus diesen Verträgen keine systematische vorbereitete Möglichkeit der Umstellung des Betriebs auf wasserstoffbetriebene Busse.

Vor dem Hintergrund der gegebenen Infrastruktur und der Lage der Linien ist eine kurzfristige Umstellung in **Phase 1** nur für folgende Linien in 2 Linienbündeln sinnvoll denkbar (vgl. dazu auch Kap. 3.2 bzw. Abbildung 9):

- Linien 2582, 2583 und 2584 („Teilnetz HEI2 Süd“, 3 Linien) sowie
- Linien 6602 und 6606 („Teilnetz West“, Wilstermarsch, 2 Linien).

Aufgrund der vorgenannten Problemstellung kann nur mittels einer indirekt gegebenen Option in den bestehenden Verkehrsverträgen ein Ansatzpunkt zur Umstellung identifiziert und konkretisiert werden. Die Prüfung der Möglichkeiten hat gezeigt, dass folgende konkrete Anknüpfungspunkte dafür gegeben sind (vorbehaltlich einer Detailprüfung):

- **Referenz:** Anlage 3, Verkehrsvertrag der Linienbündel Nord und West des Kreises Steinburg und Heide Süd des Kreises Dithmarschen, § 5 Abs. (5) öffnet mittels der Klausel für „Design- und Ausstattungsänderung“ die Möglichkeit zu Änderungen an den Fahrzeugen in einem laufenden Vertrag.
- **Prüfung I:** In anderen, vergleichbaren Fällen sind in lfd. Verkehrsverträgen Änderungen an Fahrzeugen mit Erfolg eingebracht worden. Wesentlich ist, dass dies immer und nur insoweit gelang, als dass ein Vorher-Nachher-Vergleich von Mehr- und Minderkosten im Vergleich zur Angebotskalkulation und zu den Preisen für die Fahrzeuge möglich war.
- **Prüfung II:** Deutlich schwieriger stellt sich die Abbildung der Kosten für den Fahrzeugbetrieb dar. Wenn und soweit alternative Antriebe zum Einsatz kommen, weichen die Bedingungen sowohl beim Energieverbrauch als auch bei den Kosten der lfd. Unterhaltung der Fahrzeuge schon systembedingt (Stichwort: andere Technik) ab.
- **Risikoübernahme:** Aus dem Einsatz von Fahrzeugen mit einer gänzlich neuen, noch nicht als Industriestandard zu bezeichnenden Fahrzeugtechnik entstehen Risiken, wie sie beim Einsatz eines Dieselbusses nicht bestehen. Damit ist zu klären, wie der Eintritt dieser Risiken wirtschaftlich getragen werden kann. Solche Risiken müssen, weil sie vorher nicht bestanden, von den Aufgabenträgern übernommen werden.

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass der Wechsel der Antriebstechnik bei den Fahrzeugen nur mit einer **vertraglichen Ergänzung** sichergestellt werden kann. Sie greift die genannten Randbedingungen auf, ist aber in anderen Fällen bereits erfolgreich umgesetzt worden. Demnach ist folgende Strukturierung der Aufgaben und der zugehörigen Verträge und Regelungserfordernisse möglich:

- Die **Fahrzeuge** werden nach einem Vergabeverfahren in Verbindung mit einem Wartungs- und Instandhaltungsvertrag beim Fahrzeughersteller beschafft.
- Die **Fahrzeugbeschaffung** erfolgt durch den Betreiber in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber; für die Beschaffung werden übliche Bedingungen vereinbart. Der Kaufvertrag wird mit dem Betreiber geschlossen, das Eigentum geht auf diesen über. Die Fahrzeugbeschaffung wird zu Netto-Kosten abgerechnet; ggf. verfügbare Fördermittel werden „wie üblich“ abgesetzt. Die Kosten der Beschaffung werden dem Auftraggeber vollständig in Rechnung gestellt; der Ausgleich erfolgt ratierlich, über die Vertragslaufzeit verteilt.
- Die **Fahrzeugbeschaffung** kann **alternativ** auch durch eine Gesellschaft der öffentlichen Hand bzw. der beiden Aufgabenträger/Auftraggeber realisiert werden. Damit dies wirtschaftlich vorteilhaft ist, muss diese Gesellschaft Zuschüsse für die Fahrzeugbeschaffung in Anspruch nehmen können[1]. Durch diese Gesellschaft würden die Fahrzeuge mittels entsprechender Ergänzungen in den Verträgen mit den ÖPNV-Betreibern beigestellt.
- Der Hersteller wird zur Realisierung des **Wartungs- und Instandhaltungsvertrags** die Bereitstellung einer Werkstatt verlangen, in welcher er die geschuldeten Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten ausführen kann bzw. ausführen lassen kann. Letzteres erfolgt nicht selten durch das Personal des Betreibers, welches vom Hersteller geschult und unter dessen Aufsicht eingesetzt wird. Das Risiko für die bestimmungsgemäße Funktion der Fahrzeuge liegt beim Hersteller. Die lfd. Kosten des Wartungs- und Instandhaltungsvertrags werden vom Hersteller dem Betreiber in Rechnung gestellt, der diese Rechnungen an den Auftraggeber gesondert weiterverrechnet.
- Die **lfd. Kosten des Fahrzeugbetriebs** werden für die Energiebeschaffung und den Energieverbrauch vom Fahrzeugbetreiber gegenüber dem Aufgabenträger auf Nachweis gesondert abgerechnet.
- Im **Gegenzug** werden die nicht mehr im Dieselbetrieb eingesetzten Fahrzeuge und die laufleistungsabhängigen Kosten für deren Einsatz nicht mehr nach den Konditionen des Dieselbetriebs abgerechnet; der lfd. Rechnungsbetrag wird um diese Abrechnungspositionen gekürzt.
- Für die Fahrzeuge wird gesondert eine **Übernahmeregelung an einen Folgebetreiber** vereinbart, sodass nach Auslaufen des aktuellen Vertrages die Fahrzeuge weiterverwendet werden können. Da Wartung und Instandhaltung vom Hersteller mit dem Vertrag übernommen werden, haben die Folgebetreiber keine kalkulatorischen Risiken; im Übrigen gelten diese Bedingungen im Vergabeverfahren zur Findung des Folgebetreibers für alle Bieter gleichermaßen.

Im Ergebnis entsteht eine Kostentransparenz, die den Einsatz der Fahrzeuge sowohl für den Betreiber als auch für den Aufgabenträger möglich macht. Zudem wird der Fahrzeugeinsatz auch über die aktuelle Vertragslaufzeit hinaus besichert. Eine Leasinglösung wäre möglich, lässt aber i. d. R. und anders als bei PKW sowie Kleinlastern und Lieferwagen die Inanspruchnahme von Fördermitteln bei der Fahrzeugbeschaffung nicht zu. Diese ist im Fall von Fahrzeugen des ÖPNV immer an den Kauf der Fahrzeuge gebunden; dieser Kauf erfolgt im Regelfall durch den Fahrzeugbetreiber (Konzessionär); die Übertragung des Eigentums an einen Folgebetreiber durch Verkauf ist dabei i. d. R. möglich.

---

[1] Anm.: Die überwiegende Anzahl der Förderprogramme des Bundes und der Länder setzt voraus, dass der Empfänger der Fördermittel die Fahrzeuge unmittelbar als Konzessionär betreibt und für die ordnungsgemäße Verwendung der Fördermittel verantwortlich wird, samt Übernahme von Rückzahlungsverpflichtungen, falls der Förderzweck über eine vorgegebene Bindungslaufzeit nicht erfüllt wird.

Im Übrigen ist dieses Vorgehen, sowohl in der Verbindung der Fahrzeugbeschaffung mit einem Wartungs- und Instandhaltungsvertrag als auch in der Weitergabe an einen Folgebetreiber längst ein Industriestandard, gerade in der Beschaffung und im Betrieb von Elektrobussen. Das benannte Vertragsmodell ist im Übrigen schon länger im SPNV-Betrieb erfolgreich etabliert. Besondere vergaberechtliche Risiken sind dazu nicht bekannt.

3.4 Weiteres Vorgehen

Das weitere Vorgehen wird bestimmt von der Teilaufgabe „Konkretisierung einer ersten Umsetzung“ (Phase 1). Dazu bedarf es zunächst der weiteren Klärung der Umsetzbarkeit der Varianten 1 oder 2 für Phase 1 im Einzelnen. Es sind dazu die dargestellten Ergebnisse weiter zu verifizieren, es sind die Planungen und die zeitlichen Abläufe der Realisierung der Tankstelleninfrastruktur abzustimmen und es sind ggf. offene technische Details zu klären.

In Bezug auf die Vorbereitung der Bestellung bzw. Änderung der Vorgaben für die Leistungserbringung in den Teilnetzen West (Wilstermarsch) und HEI2 Süd zur Nutzung alternativer Antriebe auf den definierten Linien sind folgende Aufgaben zu bearbeiten:

- Einholung der Beschlüsse in den Gremien und Klärung der Finanzierung;
- Innovationsvertrag bzw. Ergänzung zum Verkehrsvertrag mit dem Linienbetreiber nach dem vorgeschlagenen Lösungsansatz;
- Klärung Fahrzeugbeschaffung und Entscheidung für eine Lösung
  - Kauf durch den aktuellen ÖPNV-Betreiber **oder**
  - Kauf durch kommunales Unternehmen/Projektgesellschaft **oder**
  - Leasing beim Hersteller über Restlaufzeit (bei Verzicht auf Fahrzeugförderung);
- Vertragliche Regelung für die Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten;
- Regelung der Übernahme der Fahrzeuge an Folgebetreiber;
- Förderantrag beim Bund (BMVI bzw. NOW GmbH) für die Fahrzeuge der Phase 1.

Die Fixierung eines Innovationsvertrags bzw. die Ergänzung zum Verkehrsvertrag mit dem (jeweiligen) Linienbetreiber kann auch für mehrere Verträge und/oder unterschiedliche Betreiber nach den gleichen Vorgaben erfolgen. Ein solches Vorgehen wäre geringfügig aufwendiger in der Abstimmung (des gleichen Vorgehens mit mehreren Betreibern), sichert aber gleiche Bedingungen im lfd. Betrieb, in der Abrechnung und in der Übergabe der Fahrzeuge an die Folgebetreiber.

Am Anfang der Umsetzung i. e. S. steht im Regelfall die Ausschreibung der Fahrzeugbeschaffung, hier in Verbindung mit einem Wartungs- und Instandhaltungsvertrag. Da es sich hier nicht um eine „einfache“ bzw. „übliche“ Fahrzeugausschreibung handelt, sollte man gesonderte Expertise und einen gesonderten Aufwand einkalkulieren.

4 Wirtschaftliche Betrachtung einer Umstellung

4.1 Fahrzeugkosten

Die wirtschaftliche Betrachtung einer Umstellung stellt auf die zu erwartenden Mehrkosten einer Umstellung ab und erfasst diese in Gänze. Maßstab sind betriebswirtschaftliche Standards, nach Abzug ggf. gewährter Investitionszuschüsse. Mit dem Blick auf die betriebswirtschaftlichen Standards wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse in Gegenüberstellung zu Kosten bzw. Angebotspreisen privater Anbieter in Vergabeverfahren berücksichtigt.

Ein Teil der hier berücksichtigten Technologien hat jedoch noch längst keine Marktreife erreicht (Brennstoffzellenbusse) bzw. ist nicht einmal als Serienfahrzeug auf dem Markt verfügbar (Wasserstoffverbrennungsmotor). Daher sind die Kosten für die Fahrzeugbeschaffung und für den Fahrzeugbetrieb aus verschiedenen Quellen herangezogen und nach vergleichender Bewertung zur Anwendung gebracht worden [4][5][9][10][11][12]. Die im Einzelnen verwendeten Annahmen bei der Kalkulation finden sich in **Anlage 4**.

Bezug	Phase 1 V1	Phase 1 V2	Phase 2	Phase 3
Anzahl Busse inkl. Reserve	9	16	37	195
Laufleistung Fpl-km p.a.	380.000	775.000	2.200.000	7.500.000
Anzahl H_2-Tankstellen	1	1	3	8
zeitlicher Bezug (Jahre)	3	3	4	12

Tab. 7: Mengen und Leistungsgrößen der Kostenkalkulation (je Phase)

In **Tabelle 7** findet sich eine Übersicht der maßgeblichen Mengengrößen für die Kalkulation in Form der Anzahl der Busse (inkl. Reserve), der Leistungsparameter, der benötigten Anzahl der Tankstellen sowie der zeitliche Bezug bzw. die Laufzeit der 3 Phasen.

Der Kostenvergleich fokussiert auf die Mehrkosten im Vergleich zum Einsatz von Fahrzeugen mit Dieselantrieb, nimmt aber zusätzlich auch die Kosten eines Batteriebusbetriebs im jeweils vergleichbaren Netz mit auf. Im Rahmen der Betrachtung der Kosten des Batteriebusbetriebs wurden auch die Kosten der Ladetechnik auf dem Betriebshof mitberücksichtigt, weil sie bei dieser Technik (notwendige) Zusatzkosten im Vergleich zum Dieselbusbetrieb sind.

Die Fahrzeugkosten umfassen alle Kosten für Vorhaltung, Betrieb und Reparatur der Busse im lfd. Betrieb (Anm.: Nicht jedoch den Personalaufwand für die Fahrpersonale):

- Kosten Fahrzeuganschaffung (abzgl. Investitionszuschüsse) bzw. Kapitalkosten
- Energiekosten Fahrzeugbetrieb
- Wartungs- und Instandhaltungskosten Fahrzeugbetrieb.

Bei der Fahrzeuganschaffung wurden Marktpreise, wie sie aus den in Anlage 1 benannten Quellen gewonnen werden konnten, veranschlagt. Die Investitionszuschüsse sind nach dem Regelwerk der entsprechenden Förderprogramme des Bundes (Stand: Herbst 2019) berücksichtigt worden (vgl. auch Kap. 4.3). Die resultierenden Kapitalkosten sind auf 10 Jahre verrechnet worden, mit einem Restwert von 4%. Sonstige Kosten für die Fahrzeugvorhaltung und die Betriebshöfe sind nicht berücksichtigt worden, da diese für alle Fahrzeuge als gleich angenommen werden können.

Im laufenden Betrieb der Fahrzeuge sind bei Einsatz der neuen Technologien höhere Leerfahrtenanteile eingerechnet worden. Bei den Energiekosten sind branchenübliche Verbrauchswerte bzw. die Annahmen gem. Anlage 1 veranschlagt worden. Die Preise für Energie sind nach den Marktpreisen zum Stand Herbst 2019 eingerechnet worden. Zu beachten ist, dass zu diesem Zeitpunkt ein national einheitlich vorgegebener Verkaufspreis für Wasserstoff von 9,50 €/kg (netto) gültig war (kein Marktpreis).

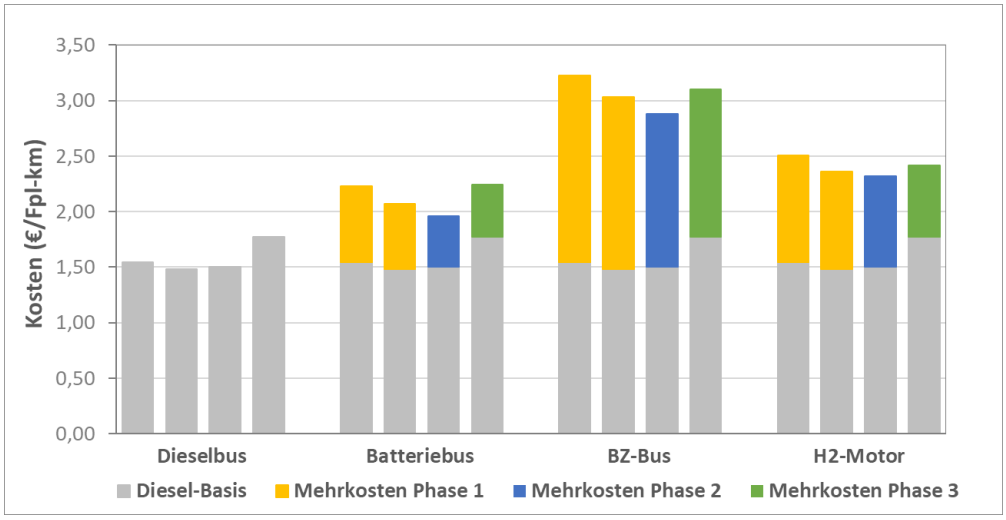

Abb. 10: Mehrkosten Fahrzeugbetrieb im Vergleich zum Dieselbus (je Phase)

Die Ergebnisse finden sich in **Abbildung 10**. Damit die Ergebnisse im Vergleich verständlich werden, ist im linken Säulenblock die Basis für den Dieselbus zu finden; sie ist in allen weiteren Fällen die Basis für die Mehrkosten (grau). Bei den verschiedenen Technologien ist die Farbgebung auf die betrachteten Phasen abgestellt (gelb, blau, grün). Da eine sichere Prognose für die Kostenentwicklung der neuen Technologien nicht möglich ist, wurde auf die zu erwartende Entwicklung im Vergleich zum Dieselbus auf der Basis der Kenntnisse im Herbst 2019 abgestellt. Folgende Annahmen sind demnach relevant:

- Maßgeblich sind heutige Preise für Busse, wobei Dieselbusse mittelfristig immer weniger gekauft werden; neue Antriebe verkaufen sich mehr. Dieselbuspreise werden nicht steigen, aber die Kaufpreise für die Fahrzeuge mit neuen Antrieben werden sinken.
- Die Kosten für die Energieträger entwickeln sich ebenso unterschiedlich: Diesel ist mit einem Preisanstieg von +3% p.a. gerechnet worden (Besteuerung), Strom mit +2% p.a. Bei alternativen Energien werden sinkende Preise erwartet [1]; es ist aber mit konstanten Preisen von heute gerechnet worden.

Demzufolge ist dies eine Kalkulation der „Sicheren Seite“. Für den Dieselbusbetrieb wird man keine Kostenminderungen unter die dargestellte Entwicklung annehmen können; bei den neuen Antrieben wird es aber in jedem Fall noch (erhebliche) Skaleneffekte geben; Näheres dazu findet sich in Kap. 4.4.

Unter den genannten Annahmen haben Busse mit Brennstoffzellentechnik immer die höchsten Mehrkosten; Busse mit Wasserstoffverbrennungsmotor fallen etwas günstiger aus, sind aber immer noch teurer als Elektrobusse mit Batterien. Nach diesen Annahmen ist ein Bus mit Brennstoffzelle in den benannten Fahrzeugbetriebskosten in etwa doppelt so teuer wie ein Dieselbus (statt 1,50 €/Fpl-km rd. 3,00 €/Fpl-km), während Batteriebusse bei etwa 2,00 €/Fpl-km liegen (Phase 2).

4.2 Infrastrukturkosten für zusätzliche H_2-Tankstellen (ab Phase 3)

In der langfristigen Perspektive von Phase 3 wird die Umstellung des gesamten Angebotsvolumens von 7,5 Mio. Fpl-km pro Jahr unterstellt. Das erfordert einen systematischen Ausbau der H_2-Tankstellen, damit die Versorgungssicherheit über beide Kreise hinweg langfristig gesichert werden kann.

Derzeit ist unklar, ob sich die Wasserstofftechnologie als Regelantrieb für den Einsatz im Straßenverkehr durchsetzen kann. Da sie effektiv nur geringe Reichweitenbeschränkungen mit sich bringt, ist sie in jedem Fall im gewerblichen Fahrzeugeinsatz vorteilhaft. Für den Fall, dass sich die Technik erst vergleichweise spät durchsetzt, gleichwohl aber frühzeitig im ÖPNV in Einsatz kommt, müsste der ÖPNV auch die (Mehr-) Kosten zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit übernehmen. Die Annahmen für diese Kalkulation für Phase 3, für die Inbetriebnahmen ab 2031, stellen sich wie folgt dar:

- Investitionskosten von ca. 3,5 Mio. € je Tankstelle bei Fremdbezug des Wasserstoffs (inkl. Kosten für tankstelleneigenen Trailer, ohne Fördermittel);
- Investitionskosten von ca. 8,0 Mio. € je Tankstelle bei eigener H_2-Produktion (inkl. Kosten für Elektrolyseur, ohne Fördermittel);
- Gesamtkosten für alle zusätzlichen, neuen Tankstellen (ohne Fördermittel) ca. 16 Mio. € (Fremdbezug) bzw. 37 Mio. € (Eigenproduktion) bei Vollversorgung.

Wie **Abbildung 11** deutlich macht, sind mit Ausnahme der Tankstelle in Glückstadt alle Tankstellen ähnlich teuer. Zudem zeigt sich, dass in allen Fällen die Varianten mit H_2-Zulieferung nur ca. 44% der Varianten mit H_2-Produktion kosten (z. B. Heide 3 Var. 1 mit 3,5 Mio. € zu Var. 2 mit 8,0 Mio. €). Dies würde sich natürlich anders darstellen, wenn zukünftig die Versorgung mit Wasserstoff über ein geschlossenes Rohrleitungsnetz erfolgen würde.

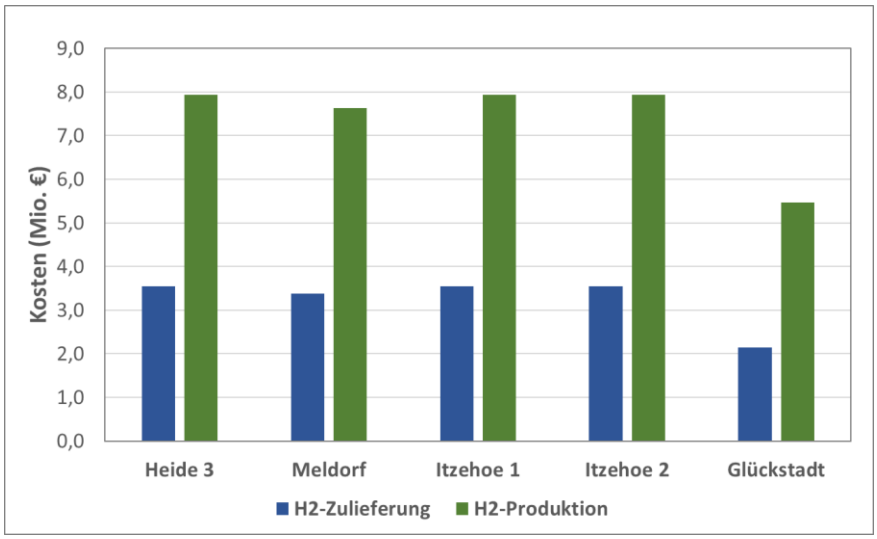

Abb. 11: Infrastrukturkosten der H_2-Tankstellen in 2 Varianten für Phase 3

Sollte sich bis Ende der 20er Jahre herausstellen, dass wasserstoffbetriebene Straßenfahrzeuge zu einem Regelantrieb werden, werden die Investitionen längst nicht in dem hier kalkulierten Umfang zu Lasten des ÖPNV zu veranschlagen sein. Denn dann stellt der ÖPNV zwar einen großen Bedarf dar, muss aber die insgesamt notwendige Infrastruktur nicht vollständig tragen. Es wären dann nur noch durchschnittliche Kosten zu berücksichtigen, die im Verkaufspreis für Wasserstoff (wie heute beim Diesel oder bei Strom) schon inkludiert wären. Wie hoch die Preise dann sein werden, kann aber heute (noch) nicht abgeschätzt werden.

4.3 Bewertung der Fördermittel für Investitionen

Nachdem hergeleitet wurde, welche Mehraufwendungen bei den Investitionen in wasserstoffbetriebene Busse und die Tankinfrastruktur erforderlich sind, war zu beurteilen, wie die verfügbaren Fördermittel für diese Investitionen bewertet werden können. Wesentlich ist dabei, dass das Grundprinzip der Förderprogramme des Bundes darauf abstellt, den Mehraufwand im Vergleich zur Anschaffung von Dieselbussen zu bezuschussen. Dazu waren einmal mehr entsprechende Annahmen erforderlich, die sich wie folgt darstellen:

- Zuschuss Fahrzeugbeschaffung Wasserstoffbusse: 40% auf den Mehraufwand
- Zuschuss Beschaffung Wasserstoffinfrastruktur: 40% auf den Gesamtaufwand
- Zuschuss Fahrzeugbeschaffung Batteriebusse: 80% auf den Mehraufwand.

Diese Annahmen bilden die tatsächliche Förderkulisse zum Stand Herbst 2019 ab. Es sei darauf hingewiesen, dass sich die Bedingungen von Förderprogramm zu Förderprogramm ändern können. Zudem ist zu erwarten, dass zukünftig die Förderung von Batteriebussen und Wasserstoffbussen deutlich stärker aufeinander abgestimmt wird. Es wurde nur die Bezuschussung der Erstanschaffung bei Umstellung der Flotten berücksichtigt. Die später notwendige Ersatzbeschaffung der schon umgestellten Flotte wurde hingegen nicht betrachtet. Die Ergebnisse für die Fahrzeugbeschaffung zeigt **Abbildung 12** für die 3 Phasen, wobei sich die Investitionen in Phase 2 in Abhängigkeit von Phase 1 (V1 oder V2) unterscheiden.

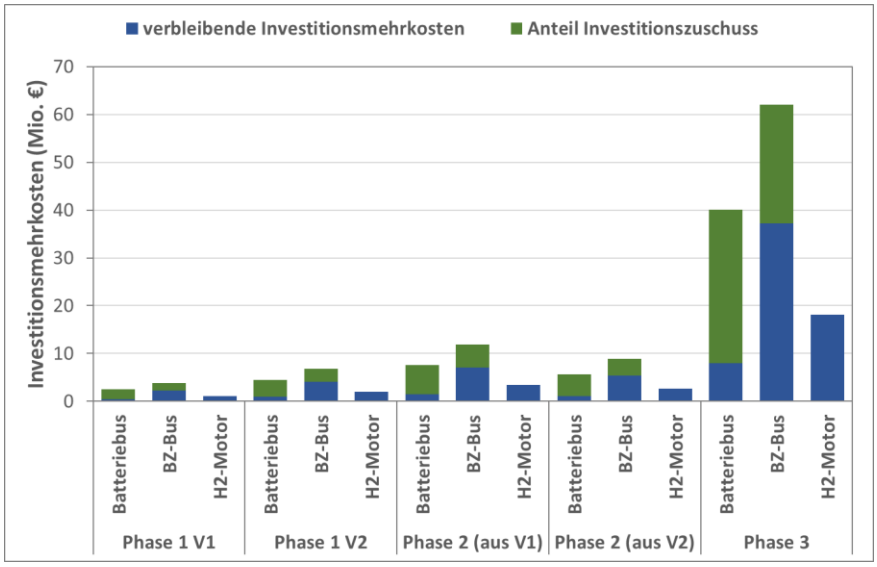

Abb. 12: Mehraufwand Investitionen Fahrzeugbeschaffung inkl. Fördermittel

Im Vergleich des Mehraufwands aus den Investitionen wird zum einen einmal mehr deutlich, dass Brennstoffzellenbusse deutlich teurer sind als Batteriebusse oder Busse mit Wasserstoffmotor; Letztere werden nicht einmal gefördert. Der insgesamt so deutliche Anstieg des Mehraufwands bei Realisierung von Phase 3 ist zum anderen dem Tatbestand geschuldet, dass zum Abschluss von Phase 3 in Summe 7,5 Mio. Fpl-km umgestellt sein sollen, was allein in der Phase 3 selbst entsprechende Investitionen für 5,3 Mio. Fpl-km bzw. für 158 zusätzliche Busse und 5 zusätzliche Tankstellen bedeutet (vgl. Tabelle 7).

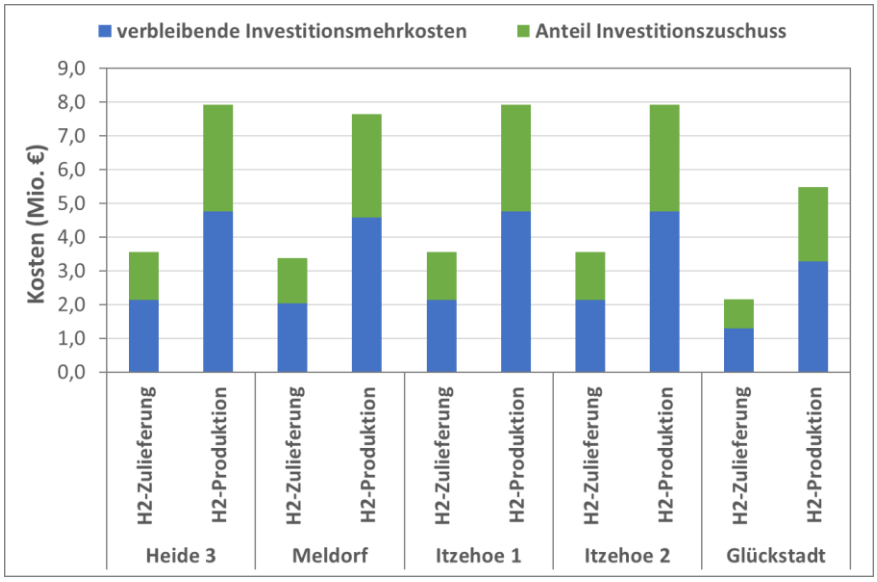

Abb. 13: Investitionen H_2-Infrastruktur in 2 Varianten inkl. Fördermittel

Abbildung 13 zeigt dann die Investitionen in die Wasserstoffinfrastruktur an den 5 konkreten Tankstellen mit den Investitionsvolumina unter der Annahme der Zulieferung des Wasserstoffs und für den Fall der Produktion des Wasserstoffs „vor Ort“ und darin jeweils anteilig die Fördermittel (analog Abbildung 11). Dabei wurde Bezug genommen auf die Programme „Maßnahmen der Marktaktivierung im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Phase 2“ sowie auf die Fördermöglichkeiten von Forschungs- und Entwicklungsprojekten zu „Entwicklung und Innovation im Rahmen des nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“, beide von der NOW GmbH, Stand Herbst 2019.

Durch den Zuschuss von 40% sinkt das Gesamtbudget von rd. 16 Mio. € bei Zulieferung des Wasserstoffs auf 9,6 Mio. €; wenn auch die Produktion mitberücksichtigt werden muss, sinkt das Volumen von (brutto) 37 Mio. € auf (netto) 22,2 Mio. €.

4.4 Wirtschaftliches Entwicklungspotenzial

Die wirtschaftliche Betrachtung einer Umstellung hat deutlich gemacht, dass derzeit die Mehrkosten für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Bussen trotz der verfügbaren Fördermittel immer noch sehr deutlich ausfallen. Der ÖPNV in beiden Kreisen würde demnach bei Vollumstellung in einem Umfang teurer werden, dass die Gesamtumstellung ggf. aus wirtschaftlichen Gründen nicht leistbar sein könnte.

Deswegen ist an dieser Stelle nochmals darauf hinzuweisen, dass die hier verwendeten, aktuell bekannten Kostengrößen für Investitionen in Wasserstoffinfrastruktur und für den laufenden Betrieb zwar bestätigt sind, aber nicht auf großindustriellen Maßstäben beruhen. Bei den Fahrzeugen sind es Kleinserienpreise, bei der Infrastruktur Preise für Pilotanlagen. Damit können in jedem Fall noch deutliche Kostensenkungen in beiden Fällen bei industrieller Entwicklung der Wasserstofftechnologie erwartet werden.

Roland Berger sieht in einer aktuellen Studie [1] deutliche Kostensenkungspotenziale, die sich demnach auch schon vergleichsweise schnell realisieren lassen. Dies erscheint realistisch, weil davon ausgegangen wird, dass man in Deutschland auch auf Seiten der Industrie die Entwicklungsbudgets gezielt auf diese neuen Fahrzeugtechniken ausrichten wird. Für das Jahr 2030 werden die folgenden Kostensenkungspotenziale im Vergleich zu den aktuellen Preisen, wie sie hier herangezogen wurden, erwartet:

- Wasserstofftankstellen mit rd. 400 kg H_2/Tag: -20%
- Herstellungskosten mittels Elektrolyse: -50%
- Fahrzeugkosten ÖPNV-Betrieb: -30%.

Insbesondere wird nach der Einschätzung von Roland Berger auch der Kostenvorteil für Batteriebusse 2030 längst nicht mehr so groß sein. Vielmehr werden Mehrkosten zum Dieselbetrieb von nur noch 10-15% über alle Kostenbestandteile bzw. die gesamten Betriebskosten bei Wasserstoffbus erwartet; für Batteriebusse beträgt der Vorteil des Dieselbusses dann nur noch 7,5%. Die Kostenprognose ist zwar auf Stadtbusse des ÖPNV ausgerichtet, aber der Stadtbusbetrieb ist ohnehin teurer als der Regionalbusbetrieb, weshalb die Effekte im hiesigen Fall eher noch günstiger ausfallen würden.

Weiterhin ist zu beachten, dass selbst dann, wenn diese Prognose nicht vollumfänglich bestätigt oder erst später erreicht wird, die hier kalkulierten Kosten wohl unterschritten werden dürften. Denn es ist erklärtes Ziel der EU-Kommission (vgl. Clean-Vehicle-Richtlinie [2]) und auch der Bundesregierung, die Wasserstofftechnologie explizit in ÖPNV-Anwendungen gezielt und bevorzugt zu einer industriellen Reife zu führen. Und es darf erwartet werden, dass auch die verfügbaren Budgets der Aufgabenträger zur Finanzierung des ÖPNV nach diesen Anforderungen positiv entwickelt werden.

5 Konzept und Budget für die Umsetzung von Phase 1

Abschließend sollen ein Konzept und ein Budget für den Einstieg in die Umsetzung abgeleitet werden. Dazu liegt aus Kap. 3.4 die Herleitung für das weitere Vorgehen vor. Das Hauptkapitel 4 befasste sich mit allen wirtschaftlichen Fragen, von den Fahrzeugkosten (Kap. 4.1) über die Infrastrukturkosten (Kap. 4.2) und die Bewertung von Fördermitteln (Kap. 4.3) bis hin zum wirtschaftlichen Entwicklungspotenzial (Kap. 4.4). Damit ist belegt worden, welche **konkreten Chancen unmittelbar gegeben** sind.

Der Lösungsvorschlag berücksichtigt die bereits (weitgehend) **fertige Tankstelle** sowie die dort angebundenen Linien in den **Kreisen Steinburg und Dithmarschen**. Damit ist eine einfache betriebliche Umsetzung **innerhalb der bestehenden Verkehrsverträge** möglich. Zudem sind notwendige Anpassungen an den Werkstätten beherrschbar. Es kann ein **Pilotbetrieb** analog einem Projekt mit einer **Laufzeit von 3 Jahren** realisiert werden. Für alle beteiligten Parteien ist das **Risiko klar zeitlich und wirtschaftlich abgegrenzt** und damit **beherrschbar**.

Die nachfolgende **Budgetierung** berücksichtigt alle Ergebnisse der Studie und führt diese **schlüssig zusammen**. Es wird demnach für Phase 1 „Einstiegsphase“ mit 3 Jahren Laufzeit die Variante 2 nach der Gliederung in Kap. 2 bis 4 (vgl. Tab. 2 und Tab. 7) als Lösungsvorschlag (Präferenzlösung der Gutachter) für beide Kreise empfohlen; alternativ wäre Variante 1 auch als „kleine“ Lösung möglich. Die **Eckpunkte** des Vorschlags stellen sich wie folgt dar:

- Lösungsvorschlag/Präferenz: **Ausnutzung** aller **Potenziale** der **Tankstelle** in **Brunsbüttel (IZ) mit Kapazitätserhöhung**, mit **16 Bussen** sowie **775.000 Fpl-km** p.a. und guter „Sichtbarkeit“ des Echtbetriebs; **Budget: 9,8 Mio. €**
- „Kleine“ Alternative: **Einstieg** nur über bestehende **Tankstelle** in **Brunsbüttel (IZ) ohne Kapazitätserhöhung** und **9 Bussen** sowie **380.000 Fpl-km** p.a. mit Praxisnachweis im örtlichen Umkreis; **Budget: 5,3 Mio. €**

Der Lösungsvorschlag der Gutachter ergibt sich nach der folgenden **Begründung**:

- H_2-Betrieb im ÖPNV wird in 2 Kreisen von Schleswig-Holstein realisiert.
- Der Pilotbetrieb ist auf den benannten Linien in beiden Kreisen fachlich begründet.
- Der Pilotbetrieb nutzt die Potenziale der bereits errichteten H_2-Tankstellen voll aus.
- Der Pilotbetrieb baut damit auf den bestehenden Wasserstoff-Initiativen vor Ort auf.

Die Präferenz der Gutachter für Variante 2 beruht darauf, dass die Umstellung von 16 Bussen eine deutlich größere Wahrnehmbarkeit und Signalwirkung hat. Zudem werden die Preise für die Bestellung der Fahrzeuge in dieser Menge günstiger sein als die Preise für die Beschaffung von nur 9 Bussen. Und alle einmaligen Projektkosten werden tendenziell in dieser Variante relativ günstiger ausfallen. Insofern hat die Kalkulation für den Lösungsvorschlag auch höhere Reserven als ausgewiesen (vgl. Tabelle 8).

Die **Budgetierung** umfasst dann im Einzelnen die folgenden Positionen (vgl. **Tabelle 8**):

- Mehrkosten bei Fahrzeuginvestitionen unter Berücksichtigung von Fördermitteln;
- Einmalaufwand für Werkstattanpassung und Schulung;
- Nachrichtlich: Keine Budgetierung für die Wasserstoffherstellung (weil im fixierten Abnahmepreis für Wasserstoff inkludiert);
- Zuschuss für den Mehraufwand im lfd. Fahrzeugeinsatz an die Verkehrsunternehmen;
- Budget für Projektmanagement, Projektbegleitung; Vorbereitung Phase 2 (Tankstellen Heide) und Sonstiges im Pilotbetrieb;

- Kalkulationsreserve für Unvorhergesehenes (insbesondere, wenn keine Fördermittel bei der Fahrzeugbeschaffung verfügbar sein sollten).

Eckpunkte und Budget - Phase 1		Zeithorizont [Jahre]	3	
		Anzahl Fahrzeuge	9	16
		Fpl-km pro Jahr	380.000	775.000
Pos.	**Aufwandsposition**	**Basis**	**kl. Alternative**	**Präferenz**
1	Investitionen Fahrzeuge (Mehrkosten, bei 50% Förderung)	212.000 € je Fzg	1.908.000 €	3.392.000 €
2	Einmalaufwand Werkstattanpassung und Schulung	-	375.000 €	750.000 €
3	Zuschuss Erweiterung Tankkapazität (optional)	-	-	375.000 €
4	Kosten für Wasserstoffherstellung	-	-	-
5	Betriebskostenzuschuss Mehraufwand H_2-Betrieb	0,40 € je Fplkm	456.000 €	930.000 €
6	Projektmanagement / Projektbegleitung / Sonstiges	20% / 15%	651.882 €	972.290 €
7	kalk. Reserve (z. B. falls keine Fahrzeugförderung)	Maß: 212.000 € je Fzg.	1.908.000 €	3.392.000 €
	Summe (Pos. 1 bis 5 netto, Pos. 6 brutto)		**5.298.882 €**	**9.811.290 €**

Anmerkungen:

zu 1: Standardlinienbus Wasserstoff ca. 650.000 € abzüglich Standardlinienbus Diesel 226.000 €

zu 2: 30.000 € - 300.000 € - Schätzung; Hohe Schwankung da Basis unbekannt / Bisher nur eine Werkstatt für alle Fahrzeuge in Phase 1 geplant, da nur ein Betreiber betroffen ist. Eine Anforderungsanalyse ist bei den Betreibern notwendig; für Var. 2 höherer Mehraufwand von Anfang

zu 3 Es sind in der Phase keine neue Tankstelle notwendig; In Variante 2 muss die bestehende Wasserstofftankstelle um 100% erweitert werden. Kapazitätserweiterung bedeutet hierbei mindestens ein zusätzlicher Tank.

zu 4: Keine Kosten für Wasserstoffherstellung, da Wasserstoff mit Bezugspreis von 9,50 €/kg beim Tankstellenbetreiber abgegolten ist, daher ist nur ein Betriebskostenzuschuss sinnvoll und notwendig.

zu 5: Mehrkosten für Busbetrieb (Betrieb von H_2-Bussen; Werkstattarbeiten, Mehraufwand Personal etc. in Summe: 0,40 €/FplKm; für 3 Jahre Pilotbetrieb).

zu 6: Entspricht 20% bzw. 15 % der Projektsumme als branchenüblichem Schätzwert; für: planerische Unterstützung, Unterstützung Vergabe & Beschaffung, Betreuung Umsetzung, technische Abnahmen, Fachgutachten, Fachjurist o. ä.

zu 7: Kalkulatorische Reserve für Unvorhergesehenes (üblich in einer solch frühen Phase); hier insbesondere auch für den Fall, dass die derzeitige Fahrzeug-förderung des Bundes (NOW) nicht verfügbar wäre.

Tab. 8: Dimensionierung Projektbudget für Phase 1 – Pilotbetrieb

Nach Abschluss des Pilotbetriebs hat der Betrieb von **Wasserstoffbussen** die **Marktreife** erreicht; die Leistungen können also in Phase 2 und Phase 3 **im Wettbewerb vergeben** werden. Hierbei ist dann von einem zusätzlichen Fahrplankilometerpreis von ca. +1,30 bis +1,50 € im Vergleich zum Betrieb mit Dieselbussen (über alle Kosten, Stand 2020) auszugehen (vgl. Kap. 4.1).

Aus den in Tabelle 8 dargestellten Kostenpositionen kann der zu erwartende Mittelabfluss der beiden Kreise für beide Varianten geplant werden (vgl. **Anlage 5**). Die Darstellung unterscheidet die Vorlaufzeit bis zur Inbetriebnahme (Jahr 0) und die ersten 3 Jahres des Betriebes (Jahre 1 bis 3). Weiterhin sind in den oberen beiden Zeilen 2 Szenarien (Pos. 1a und Pos. 1b) für mögliche **Fördermittel zur Finanzierung der Mehrkosten der Fahrzeuganschaffung** des Bundes dargestellt. Die Mittel würden mit der Beschaffung, also vor der Inbetriebnahme, bereitgestellt und damit im Jahr 0 an den zukünftigen Betreiber fließen. Im Fall der Förderung der Mehrkosten zu 100% verblieben bei den Kreisen keine Mehrkosten für die Fahrzeugbeschaffung. Im Fall der Förderung der Mehrkosten zu 50% sind die verbleibenden 50% der Mehrkosten an die Betreiber über die Betriebslaufzeit von 10 Jahre als Mehraufwand auszugleichen. Die entsprechende Reserve ist unten in den Tabellen als Pos. 7 dargestellt.

Die in den Position 2 bis 7 von **Anlage 5** dargestellten Mehraufwendungen sind ggf. aus Sicht der Kreise an anderer Stelle förderfähig. Welche tatsächlichen verbleibenden Aufwendungen bei den Kreisen final zum Tragen kommen können, wird erst klar sein, wenn entsprechende Förderanfragen gestellt wurden. Es ist darauf hinzuweisen, dass neben den Mehraufwendungen für die Fahrzeugbeschaffung (Pos. 1a und 1b) auch **alle einmaligen Mehrkosten anfangs**, wie sie in Jahr 0 in beiden Varianten in den Positionen 2 bis 7 dargestellt sind, förderfähig sind.

Anlagen 1 bis 5: Kalkulationsparameter und Budgetierung der Kreise

Anlage 1

Parameter für die Energiebedarfsermittlung; Quellen: [4][5] und eigene Abschätzungen

Gefäßgröße	Energieverbrauch (kg H_2/100km)	
	BZ-Busse	H_2-Motor
Solobus	10,5	12
Midibus	8,4	9,6
Kleinbus	5,25	6

Anlage 2

Parameter der CO_2-Emissionen von Straßenfahrzeugen; Quellen: [5][6][7][8]

alle Emissionen (kg CO_2/100 km)	Lokal emittierte Emissionen	Emissionen aus der Energieträgerbereitstellung
	CO_2	CO_2
ÖPNV-Dieselbus	110,7	23,3
PKW mit Dieselmotor	14,3	3,1
ÖPNV-Brennstoffzellenbus	0	0
ÖPNV-Bus mit Wasserstoffverbrennungsmotor	0,031	0

Anlage 3

Parameter für die Wirtschaftlichkeitsrechnung der H_2-Infrastruktur; Quellen: [4][9]

Parameter	Kosten (€)
Anschaffungskosten H_2-Hochdruckspeicher (400 kg H_2)	250.000
Anschaffungskosten Zapfsäule	200.000
Anschaffungskosten Verdichter	250.000
Anschaffungskosten Trailer	250.000
Anschaffungskosten Elektrolyseur	[9]

Anlage 4

Parameter der Wirtschaftlichkeitsrechnung des Fahrzeugeinsatzes (Basiswerte)
Quellen: [4][5][10][11] [12]

Parameter	**Dieselbus**			**Batteriebus**			**Brennstoffzellenbus**			**H2-Verbrennungsmotor**		
Gefäßgröße	Solobus	Kleinbus	Midibus	Solobus	Kleinbus	Midibus	Solobus	Kleinbus	Midibus	Solobus	Kleinbus	Midibus
Verkehrsvertragsdauer (Jahre)	**3**											
Fahrzeuge												
Anschaffungskosten pro Fahrzeug (€)	226.000	115.000	160.000	450.000	225.000	315.000	650.000	325.000	455.000	350.000	175.000	245.000
Instandhaltungskosten der Fahrzeuge (€/km)	0,31	0,16	0,22	0,46	0,23	0,32	0,58	0,29	0,41	0,22	0,11	0,16
Nutzungsdauer Fahrzeuge (Jahren)	10			10			10			10		
Restwert Fahrzeuge (%)	4			4			4			4		
Infrastruktur												
Anschaffungskosten H2-Hochdruckspeicher- 400 kg H2 (€)	-			-			250.000			250.000		
Anschaffungskosten Trailer (€)	-			-			250.000			250.000		
Anschaffungskosten Verdichter (€)	-			-			250.000			250.000		
Anschaffungskosten Zapfsäule (€)	-			-			200.000			200.000		
Anschaffungskosten Elektrolyseur Faktor a	-			-			2.500			2.500		
Anschaffungskosten Elektrolyseur Faktor b	-			-			3.070.000			3.070.000		
Wartungs- und Instandhaltungskosten H2-Infrastruktur (% pro Jahr von	-			-			4			4		
Nutzungsdauer H2-Tankstelle (Jahren)	-			-			20			20		
Nutzungsdauer H2-Hochdruckspeicher (Jahren)	-			-			20			20		
Nutzungsdauer Trailer (Jahren)	-			-			11			11		
Nutzungsdauer Verdichter (Jahren)	-			-			20			20		
Nutzungsdauer Zapfsäule (Jahren)	-			-			20			20		
Nutzungsdauer Elektrolyseur (Jahren)	-			-			10			10		
Trailerfahrt (€)	-			-			700			700		
Anschaffungskosten Ladegeräte pro Ladekabel (€)	-			40.000			-			-		
Anschaffungskosten Ladegeräte (inkl. anteilig Anschluss+Installtion) (€)	-			15.000			-			-		
Wartungs- und Instandhaltungskosten Ladegerät (% por Jahr von Invest.)	-			2			-			-		
Nutzungsdauer Ladegerät (Jahren)	-			14			-			-		
Energie												
Energieverbrauch H2 (kg/100km)	-			-			8,00	4,00	6,40	11,50	5,75	9,20
Wirkungsgrad der Elektrolyse	-			-			0,7			0,7		
Heizwert Wasserstoff (kWh/kg)	-			-			33,3			33,3		
Energieverbrauch Strom Verdichter nach Elektrolyse (kWh/kg H2)	-			-			4			4		
Energieverbrauch Diesel (l/km)	0,40	0,20	0,32	-			-			-		
AdBlue-Verbrauch Dieselbusse (l/km)	0,008	0,004	0,006	-			-			-		
Energieverbrauch Strom (kWh/km)	-			1,10	0,55	0,88	-			-		
Wirkungsgrad des Ladeprozesses	-			0,893			-			-		
Energieverbrauch Zusatzheizung (l/h)	0,40	0,20	0,32	2,03	1,02	1,62						
Wasserstoffpreis an einer öff. Tankstelle (€/kg)	-			-			9,50			9,50		
Wasserstoffpreis an einem Hersteller (€/kg)	-			-			7,23			7,23		
Jährliche Entwicklung Wasserstoffpreis (%/Jahr)	-			-								
Strompreis (€/kWh) (Verbrauch von 0 - 0,16 Mio. kWh/Jahr)	-			0,19			0,19			0,19		
Strompreis (€/kWh) (Verbrauch von 0,16 - 20 Mio. kWh/Jahr)	-			0,17			0,17			0,17		
Strompreis (€/kWh) (Verbrauch von 70 - 150 Mio. kWh/Jahr)	-			0,10			0,10			0,10		
Jährliche Entwicklung Strompreis (% pro Jahr)	-			2			2			2		
Dieselpreis (€/L)	1,16			1,16			-			-		
Jährliche Entwicklung Dieselpreis (% pro Jahr)	3			3			-			-		
AdBlue-Preis (€/l)	0,40			-			-			-		
Jährliche Entwicklung AdBlue (% pro Jahr)	2			-			-			-		

Anlage 5

Anzunehmender Mittelabfluss auf Seiten der Kreise Dithmarschen und Heide bei Realisierung des Projekts nach dem Konzept für die Umsetzung von Phase 1

Möglicher Mittelabfluss bei den Kreisen, kleine Alternative Gutachter (Variante 1 -) - Phase 1										
Pos.	Aufwandsposition	Gesamt	Steinburg				Dithmarschen			
	Zeitbezug (Laufzeit Projekt)	-	0	1	2	3	0	1	2	3
	Anzahl Neufahrzeuge	9	4				5			
	Fpl-km pro Jahr	380.000	187.000	187.000	187.000	187.000	193.000	193.000	193.000	193.000
1a	**Investitionszuschuss Fahrzeuge (BMVI) 100%**	**3.816.000 €**	1.696.000 €	0 €	0 €	0 €	2.120.000 €	0 €	0 €	0 €
1b	**Investitionszuschuss Fahrzeuge (BMVI) 50%**	**1.908.000 €**	848.000 €	0 €	0 €	0 €	1.060.000 €	0 €	0 €	0 €
2	Einmalaufwand Werkstattanpassung und Schulung	375.000 €	187.500 €	0 €	0 €	0 €	187.500 €	0 €	0 €	0 €
3	Zuschuss Erweiterung Tankkapazität (optional)	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
4	Kosten für Wasserstoffherstellung	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
5	Betriebskostenzuschuss Mehraufwand H_2-Betrieb	456.000 €	0 €	67.556 €	67.556 €	67.556 €	0 €	84.444 €	84.444 €	84.444 €
6	Projektmanagement / Projektbegleitung / Sonstiges	651.882 €	249.192 €	13.511 €	13.511 €	13.511 €	311.490 €	16.889 €	16.889 €	16.889 €
	Budget Kreise, 100% Fzg.-Förderung (bis Jahr 3 Betrieb)	**1.482.882 €**	**436.692 €**	**81.067 €**	**81.067 €**	**81.067 €**	**498.990 €**	**101.333 €**	**101.333 €**	**101.333 €**
7	kalk. Reserve Kreise (Fahrzeugförderung nur 50%) (Mehrkosten für die Kreise, auf 10 Jahre zu verrechnen)	1.908.000 €	0 €	84.800 €	84.800 €	84.800 €	0 €	106.000 €	106.000 €	106.000 €
	Budget Kreise, 50% Fzg.-Förderung (bis Jahr 3 Betrieb)	**2.055.282 €**	**436.692 €**	**165.867 €**	**165.867 €**	**165.867 €**	**498.990 €**	**207.333 €**	**207.333 €**	**207.333 €**

Anm. zu Zeile 5: Die Betriebskosten der Busse sind nach 3 Jahren besser einzuschätzen. Sie dürften tendenziell sinken, was es aber abzuwarten gilt. Aus Gründen der Vorsicht über 10 Jahre einplanen!
Anm. zu Zeile 7: Die kalkulatorische Reserve ist über die Laufzeit von 10 Jahren einzuplanen, also über den gesamten Refinanzierungszeitraum für die Busse.

Möglicher Mittelabfluss bei den Kreisen, Präferenz Gutachter (Variante 2) - Phase 1										
Pos.	Aufwandsposition	Gesamt	Steinburg				Dithmarschen			
	Zeitbezug (Laufzeit Projekt)	-	0	1	2	3	0	1	2	3
	Anzahl Neufahrzeuge	16	6				10			
	Fpl-km pro Jahr	775.000		251.000	251.000	251.000		524.000	524.000	524.000
1a	**Investitionszuschuss Fahrzeuge (BMVI) 100%**	**6.784.000 €**	2.544.000 €	0 €	0 €	0 €	4.240.000 €	0 €	0 €	0 €
1b	**Investitionszuschuss Fahrzeuge (BMVI) 50%**	**3.392.000 €**	1.272.000 €	0 €	0 €	0 €	2.120.000 €	0 €	0 €	0 €
2	Einmalaufwand Werkstattanpassung und Schulung	750.000 €	375.000 €	0 €	0 €	0 €	375.000 €	0 €	0 €	0 €
3	Zuschuss Erweiterung Tankkapazität (optional)	375.000 €	187.500 €	0 €	0 €	0 €	187.500 €	0 €	0 €	0 €
4	Kosten für Wasserstoffherstellung	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
5	Betriebskostenzuschuss Mehraufwand H_2-Betrieb	930.000 €	0 €	116.250 €	116.250 €	116.250 €	0 €	193.750 €	193.750 €	193.750 €
6	Projektmanagement / Projektbegleitung / Sonstiges	972.290 €	294.859 €	23.250 €	23.250 €	23.250 €	491.431 €	38.750 €	38.750 €	38.750 €
	Budget Kreise, 100% Fzg.-Förderung (bis Jahr 3 Betrieb)	**3.027.290 €**	**857.359 €**	**139.500 €**	**139.500 €**	**139.500 €**	**1.053.931 €**	**232.500 €**	**232.500 €**	**232.500 €**
7	kalk. Reserve Kreise (Fahrzeugförderung nur 50%) (Mehrkosten für die Kreise, auf 10 Jahre zu verrechnen)	3.392.000 €	0 €	127.200 €	127.200 €	127.200 €	0 €	212.000 €	212.000 €	212.000 €
	Budget Kreise, 50% Fzg.-Förderung (bis Jahr 3 Betrieb)	**4.044.890 €**	**857.359 €**	**266.700 €**	**266.700 €**	**266.700 €**	**1.053.931 €**	**444.500 €**	**444.500 €**	**444.500 €**

Anm. zu Zeile 3: Das Budget ist bei den Aufgabenträgern veranschlagt; es könnte auch direkt vom Land an die Betreiber gehen. Hier im Budget der Vollständigkeit halber genannt (keine Folgekosten!).
Anm. zu Zeile 5: Die Betriebskosten der Busse sind nach 3 Jahren besser einzuschätzen. Sie dürften tendenziell sinken, was es aber abzuwarten gilt. Aus Gründen der Vorsicht über 10 Jahre einplanen!
Anm. zu Zeile 7: Die kalkulatorische Reserve ist über die Laufzeit von 10 Jahren einzuplanen, also über den gesamten Refinanzierungszeitraum für die Busse.

Literaturverzeichnis

[1] Roland Berger, "Potenziale der Wassserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg", Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg, München, 2020

[2] Richtlinie (EU) 2019/1161 des europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge "Clean-Vehicle-Richtlinie", Brüssel, 2019

[3] Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein "Norddeutsche Wasserstoffstrategie", November 2019

[4] NOW GmbH, „Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV", Berlin, 2019

[5] KEYOU, persönliches Interview von BPV, Unterschleißheim, 21. Oktober 2019

[6] ADAC e.V., "Die sparsamsten Diesel aller Klassen", München, lfd. aktualisiert, https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/autokosten/die-sparsamsten-diesel-aller-klassen/, Zugriff am 27. Januar 2020

[7] Natural Resources Canada, „Learn the facts fuel consumption and CO2," Ottawa, 2014

[8] Joint Research Centre of the European Commission, „Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context", Brussels, 2011

[9] Thinkstep, „New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots", Stuttgart, 2017

[10] Fraunhofer IVI, „E-Bus-Standard - Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse", Dresden, 2017

[11] Fuell Cells and Hydrogen joint undertaking, „CHIC - Final Report", Brussels, 2017

[12] Wind to Gas Energy GmbH & Co. KG (Wind2Gas), Fachinterview von BPV mit Herrn Tim Brandt, Geschäftsführer, Brunsbüttel, 23.09.2019

[13] Entwicklungsagentur Region Heide, Fachinterview von BPV mit Herrn Dirk Burmeister, Geschäftsführer, Heide, 02.09.2019