© T. Weller

WaBe – Neuartige Wasserstoffbetriebstankstelle für die Stuttgarter Straßenbahnen AG zur zuverlässigen und kosteneffizienten Versorgung der Brennstoffzellenbusflotte mit Wasserstoff

Abschlussbericht

Förderkennzeichen: 03B102032

Stuttgarter Straßenbahnen AG

Markus Wiedemann

SSB

Gefördert durch

Bundesministerium für Digitales und Verkehr

Koordiniert durch

NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Document control sheet

1. ISBN or ISSN	**2. type of document (e.g. report, publication)** Veröffentlichung (Publikation)
3. title WaBe - Innovative hydrogen refueling station for SSB AG for the reliable and cost-efficient supply of hydrogen to the fuel cell bus fleet	
4. author(s) (family name, first name(s)) Wiedemann, Markus	**5. end of project** 30.11.2023
	6. publication date 29.05.2024
	7. form of publication Sonstiges
8. performing organization(s) name, address SSB AG Schockenriedstraße 50 70565 Stuttgart	**9. orginators report no.**
	10. reference no. 03B102032
	11. no. of pages 54
12. sponsering agency (name, address) Federal Ministry for Digital and Transport Invalidenstraße 44 10115 Berlin	**13. no. of references** 2
	14. no. of tables 6
	15. no. of figures 28
16. DOI (Digital Object Identifier)	
17. presented at (title, place, date)	

18. abstract

In this project, an in-house infrastructure for the reliable and cost-efficient supply of hydrogen to the fuel cell bus fleet of SSB AG was established and tested.

To this purpose, the Stuttgart bus company built its own hydrogen filling station at the bus depot in Stuttgart-Gaisburg and used it to refuel four hydrogen-powered fuel cell buses already in daily service. In contrast to cost intensive 700-bar hydrogen filling stations for passenger cars, the buses at the depot are refueled with 350 bar in order to be able to use robust and less complex components. The aim of the to the project was to demonstrate an increased availability of the filling station while reducing investment and operating costs. The newly built hydrogen filling station supports SSB's own goal of converting all inner-city bus routes to emission-free drives by 2027.

The hydrogen filling station concept was evaluated as part of the accompanying studies. In terms of reliability and availability, the technological maturity of the components used and the investment and operating costs were examined with the help of operational monitoring. In addition, the next expansion stage of the refueling infrastructure for up to 50 fuel cell buses was developed.

With this project, SSB AG is sending a clear signal to vehicle manufacturers and bus operators that the Stuttgart bus company will continue to rely on hydrogen powered fuel cell technology in the future.

19. keywords

Hydrogen filling station, fuel cell buses, depot filling station, hydrogen supply

20. publisher	**21. price**

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2302426-16

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht

3. Titel
WaBe - Neuartige Wasserstoffbetriebstankstelle für die Stuttgarter Straßenbahnen AG zur zuverlässigen und kosteneffizienten Versorgung der Brennstoffzellenbusflotte mit Wasserstoff

4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]	5. Abschlussdatum des Vorhabens
Wiedemann, Markus	30.11.2023
	6. Veröffentlichungsdatum 29.05.2024
	7. Form der Publikation Sonstiges
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Stuttgarter Straßenbahnen AG Schockenriedstraße 50 70565 Stuttgart	**9. Ber.-Nr. Durchführende Institution**
	10. Förderkennzeichen 03B102032
	11. Seitenzahl 54
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) Invalidenstraße 44 10115 Berlin	**13. Literaturangaben** 2
	14. Tabellen 6
	15. Abbildungen 28

16. DOI (Digital Object Identifier)

17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)

18. Kurzfassung
In diesem Projekt wurde eine betriebsinterne Infrastruktur zur zuverlässigen und kosteneffizienten Versorgung der Brennstoffzellenbusflotte der SSB AG mit Wasserstoff eingerichtet und erprobt.

Hierzu baute das Stuttgarter Busunternehmen eine eigene Wasserstofftankstelle auf dem Betriebshof in Stuttgart-Gaisburg und nutzte diese zur Betankung der vier bereits im täglichen Linieneinsatz befindlichen wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenbusse. Anders als bei aufwändigen 700-bar-Wasserstofftankstellen für Pkws wurden die Busse auf dem Betriebshof mit 350 bar betankt, um robuste und weniger komplexe Anlagenkomponenten verwenden zu können. Das Ziel des Projekts war es, eine erhöhte Verfügbarkeit der Tankstelle bei gleichzeitiger Reduzierung der Investitions- und Betriebskosten nachzuweisen. Die hauseigene Wasserstofftankstelle fügt sich in das Ziel der SSB ein, alle Innenstadtbuslinien bis 2027 auf emissionsfreie Antriebe umzustellen.

Im Rahmen der Begleituntersuchungen wurde das Konzept der Wasserstofftankstelle bewertet. Mithilfe eines Betriebsmonitorings wurden neben der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der technologische Reifegrad der eingesetzten Komponenten sowie die Investitions- und Betriebskosten untersucht. Darüber hinaus wurde der nächste Ausbauschritt der Betankungsinfrastruktur für bis zu 50 Brennstoffzellenbusse ausgearbeitet.

Mit dem Projekt sendet die SSB AG ein klares Signal an die Fahrzeughersteller und Busbetreiber, dass das Stuttgarter Busunternehmen auch zukünftig auf die Brennstoffzellentechnologie setzt.

19. Schlagwörter
Wasserstofftankstelle, Brennstoffzellenbusse, Betriebshoftankstelle, Wasserstoffversorgung

20. Verlag	21. Preis

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2302425-36

Inhaltverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 4

Tabellenverzeichnis 5

I. Kurze Darstellung 6

1 Aufgabenstellung 6

2 Voraussetzungen 7

3 Planung und Ablauf des Vorhabens 8

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand 10

4.1 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die benutzt wurden 11

4.2 Verwendete Fachliteratur sowie Informations- und Dokumentationsdienste 12

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 12

II. Eingehende Darstellung 13

1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse 13

1.1 Beschaffung & Inbetriebnahme 13

1.2 Betrieb & Wartung 23

1.3 Begleituntersuchungen & technologisch-wirtschaftliche Bewertung 27

1.3.1 Planung und Vorbereitung 27

1.3.2 Betriebliches Monitoring 29

1.3.3 Technologisch-wirtschaftliche Bewertung 33

1.3.4 Entwicklung eines Lastenhefts 45

1.3.5 Optimierung der Tankstelle 46

1.4 Projektmanagement & Wissenstransfer 48

1.4.1 Projektmanagement 48

1.4.2 Wissenstransfer 48

2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 51

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 52

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses 53

5 Während des Projektes bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen 53

Literaturverzeichnis 54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Satellitenaufnahme des Betriebshofs der SSB AG 9

Abbildung 2: Konzeption der Wasserstoffbetriebshoftankstelle 14

Abbildung 3: Entwurfs- und Genehmigungsplanung der Wasserstoffbetriebshoftankstelle in Stuttgart-Gaisburg 15

Abbildung 4: Prüfbericht gemäß § 18 Betriebssicherheitsverordnung 16

Abbildung 5: Ausführungsplan der Wasserstoffbetriebshoftankstelle 17

Abbildung 6: Erstellung der Bohrpfähle für das Fundament der Kompressor-Station 18

Abbildung 7: Errichtung der Brandschutzwand 19

Abbildung 8: Fertiggestellter Rohbau 19

Abbildung 9: Explosionsschutzdokument und tätigkeitsbezogene Gefährdungsbeurteilung 21

Abbildung 10: Bedienungsanleitungen für das Tanken und den Auflieger der Wasserstoffanlieferung 22

Abbildung 11: Wasserstoffbetriebshoftankstelle in Stuttgart-Gaisburg 22

Abbildung 12: Lastenheft für die Wasserstofflieferung 24

Abbildung 13: Komponenten der Wasserstofftankstelle 25

Abbildung 14: Monatliche Wasserstoffverbräuche an der Betriebshoftankstelle 29

Abbildung 15: Erfasste Laufleistung einzelner Brennstoffzellenbusse 32

Abbildung 16: Wasserstoffverbräuche einzelner Brennstoffzellenbusse 32

Abbildung 16: Beispielhafte Betriebshof- und Tankstellendynamik in Szenario 1 36

Abbildung 17: Betriebshof- und Tankstellendynamik in Szenario 2 38

Abbildung 18: Betriebshof- und Tankstellendynamik in Szenario 3 39

Abbildung 19: Betriebshof- und Tankstellendynamik in Szenario 4 40

Abbildung 20: Vergleich der Investitionskosten der untersuchten Szenarien 42

Abbildung 21: Vergleich der Gesamtkosten der untersuchten Szenarien 43

Abbildung 22: Vergleich der spezifischen Gesamtkosten der untersuchten Szenarien 44

Abbildung 24: Lastenheft für eine Wasserstofftankstelle zur Versorgung von 50 wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenbussen 46

Abbildung 25: Nachrüstung der Wasserstoffbetriebshoftankstelle in Stuttgart-Gaisburg 47

Abbildung 26: Innovationsbeauftragter der Bundesregierung für den Bereich "Grüner Wasserstoff" zu Besuch in Stuttgart-Gaisburg 49

Abbildung 27: Indische Delegation zu Besuch in Stuttgart-Gaisburg....50

Abbildung 28: Teilnehmer des 3. HyLand-Fachworkshops zu Besuch in Stuttgart- Gaisburg 51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete 8

Tabelle 2: Zusammenstellung der relevanten Datenpunkte....27

Tabelle 3: Auszug aus der Erfassung der Betriebsdaten zur Busbetankung 30

Tabelle 4: Gesamtlaufleistung, Gesamttankmenge und Durchschnittsverbrauch aller Brennstoffzellenbusse....33

Tabelle 5: Übersicht über die in der technologisch-wirtschaftlichen Bewertung analysierten Szenarien 35

Tabelle 6: Annahmen Kostenrechnung 43

I. Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Mit steigenden Mobilitätsbedürfnissen in der Bevölkerung ist es gerade im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) sehr wichtig, zukunftsfähige und nachhaltige Verkehrslösungen bereitzustellen.

Eine große Rolle können dabei wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenbusse spielen. Diese Busse gelten als lokal emissionsfrei und haben eine zufriedenstellende Reichweite. Werden erneuerbare Energien für die Wasserstoffherstellung verwendet, lassen sich weitere Emissionssenkungen erreichen.

Die Infrastruktur für die Busversorgung mit Wasserstoff stellt ein zentrales Element dar, da dadurch nicht nur die Verfügbarkeit der Busse, sondern auch der wirtschaftliche Betrieb maßgeblich beeinflusst wird. Dieser Themenbereich rückt zunehmend in den Interessensfokus der Busbetreiber. Für einen effizienten Einsatz der Brennstoffzellenbusse im ÖPNV ist eine Betankungsmöglichkeit auf einem eigenen Betriebshof oder in seiner unmittelbaren Nähe von Belang.

In Rahmen dieses Projektes soll eine betriebsinterne Infrastruktur zur zuverlässigen und kosteneffizienten Versorgung der Brennstoffzellenbusflotte der Stuttgarter Straßenbahnen AG (SSB) mit Wasserstoff eingerichtet und erprobt werden. In diesem Sinne plant das Stuttgarter Busunternehmen eine eigene Wasserstofftankstelle auf dem Betriebshof in Stuttgart-Gaisburg zu errichten und diese zur Betankung der vier bereits im täglichen Linieneinsatz in der Innenstadt befindlichen wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenbusse zu nutzen. Des Weiteren soll die Brennstoffzellenbusflotte der SSB ausgebaut werden[1]. Die hauseigene Infrastruktur für die Versorgung der Brennstoffzellenbusflotte mit Wasserstoff fügt sich in das Ziel[2] der SSB ein, alle Innenstadtbuslinien bis 2027 auf emissionsfreie Antriebe umzustellen [1].

[1] - SSB plant außerhalb des Projektes eine Erweiterung ihrer Brennstoffzellenbusflotte durch Neubeschaffungen bzw. dauerhaften Felderprobung von Vorserienfahrzeugen.

[2] - vgl. https://www.stuttgart.de/service/aktuelle-meldungen/oktober-2023/investitionsprogramm-fuer-die-stuttgarter-innenstadtbuslinien-beschlossen-bis-2027-sollen-im-talkessel-alle-busse-der-ssb-mit-emissionsfreien-antrieben-unterwegs-sein.php

Anders als bei aufwändigen 700-bar-Wasserstofftankstellen für Pkws sollen die Busse auf der zu errichtenden Betriebshoftankstelle in Stuttgart-Gaisburg mit 350 bar betankt werden. Somit können robuste und weniger komplexe Anlagenkomponenten verwendet werden[1]. Angestrebt werden dabei eine höhe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Tankstelle sowie eine Minderung der Investitions- und Betriebskosten.

Nach Inbetriebnahme der Tankstellenanlage sollen Begleituntersuchungen durchgeführt werden, um das Konzept der Wasserstofftankstelle zu bewerten. Mithilfe eines kontinuierlichen Betriebsmonitorings werden neben der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der technologische Reifegrad der eingesetzten Komponenten sowie die Investitions- und Betriebskosten untersucht. Darüber hinaus wird der nächste Ausbauschritt der Betankungsinfrastruktur für bis zu 50 Brennstoffzellenbusse ausgearbeitet. Ziel ist es, mehr Transparenz über technische und wirtschaftliche Aspekte der Versorgung der Brennstoffzellenbusse mit Wasserstoff zu gewinnen und praktische Erfahrungen hinsichtlich der Alltagstauglichkeit, Verfügbarkeit, Betriebsstrategie und Wirtschaftlichkeit zu sammeln.

Mit dem Projekt sendet die SSB AG ein klares Signal an die Fahrzeughersteller und Busbetreiber, dass das Stuttgarter Busunternehmen - eines der größten Verkehrsunternehmen Deutschlands - auch zukünftig auf die Brennstoffzellentechnologie setzt. Die Erkenntnisse aus dem Projekt stehen dem Hersteller und den Busbetreibern zur Verfügung und unterstützen die Nachhaltigkeitsstrategie der SSB, um den konsequenten Ausbau der Brennstoffzellenbusflotte und der zugehörigen Infrastruktur voranzubringen. Gerade im Hinblick auf Flottenanwendungen stellen die Projekterkenntnisse ein Schlüsselelement für eine funktionierende Wasserstoffwirtschaft dar.

2 Voraussetzungen

Um die hauseigene Wasserstofftankstelle auf dem Betriebshof in Stuttgart-Gaisburg errichten und 36 Monate erproben zu können, reichte die SSB AG im Oktober 2017 einen Antrag auf Gewährung der Bundeszuwendung im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Phase 2 (NIP-II) des Ministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) ein. Der Antrag wurde im November 2018 für den Zeitraum vom 01.01.2019 bis 30.04.2022 bewilligt.

[1] - basierend auf der erprobten Erdgasbetankung von Bussen

Das Projekt startete am 01.01.2019. Alle Arbeiten innerhalb des Projektes verliefen größtenteils planmäßig. Bestellungen der Anlagekomponenten und weitere Beauftragungen erfolgten wie geplant. Allerdings kam es zu einer Corona bedingten Verzögerung des Genehmigungsprozesses der zuständigen Behörden vor Ort und zu einer verspäteten Lieferung der Wasserstofftankstelle. Dadurch konnte die Wasserstofftankstelle nicht zum vorgesehenen Termin in Betrieb genommen werden.

Aus diesem Grund beantragte SSB im Februar 2021 eine Laufzeitverlängerung des Projektes um 19 Monate, um den Untersuchungszeitraum von 36 Monaten beizubehalten und damit eine zuverlässige Datenbasis für die Versorgung der Busflotte mit Wasserstoff zu schaffen. Der Antrag der SSB wurde im März 2021 genehmigt und die Laufzeit des Projekts verlängerte sich dadurch bis zum 30.11.2023.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt dauerte insgesamt vom 01.01.2019 bis zum 31.11.2023 und wurde in vier Arbeitspaketen bearbeitet. Die Arbeitspakete sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete

Arbeitspakete		Projektpartner
AP1	**Beschaffung & Inbetriebnahme** Beschaffung der Infrastruktur, Aufbau und Inbetriebnahme der Tankstelle	SSB
AP2	**Betrieb & Wartung** Schulung zur Handhabung der H_2-Tankstelle, Mehraufwand zum Betanken der BZ-Busse mit H_2, H_2-Transport auf den Betriebshof	SSB
AP3	**Begleituntersuchungen & technologisch-wirtschaftliche Bewertung** Planung und Vorbereitung der Begleitforschung, betriebliches Monitoring und technologisch-wirtschaftliche Bewertung, Entwicklung eines Lastenhefts für die H_2-Tankstelle	SSB/Sphera
AP4	**Projektmanagement & Wissenstransfer** Technisches und kaufmännisches Projektmanagement, Stakeholder-Informationen & Wissenstransfer	SSB/Sphera

Die Arbeitspakete 1 und 2 werden von der SSB AG ausgeführt und beinhalten die Einrichtung, Inbetriebnahme sowie den Betrieb und die Wartung der Betriebshoftankstelle in Stuttgart-Gaisburg. Der Betriebshof der SSB in Stuttgart-Gaisburg ist in Abbildung 1 dargestellt.

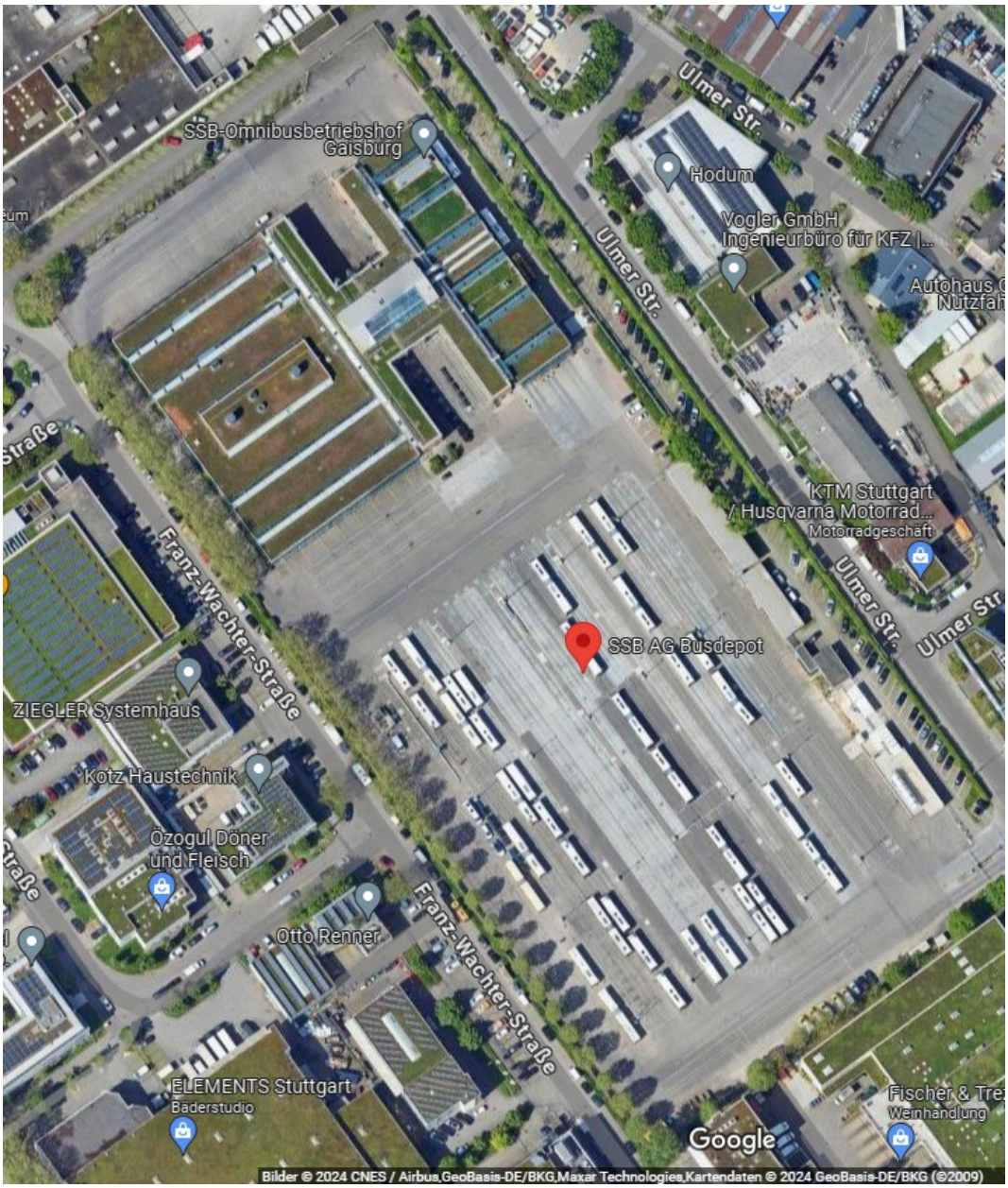


Abbildung 1: Satellitenaufnahme des Betriebshofs der SSB AG

Die Begleituntersuchungen im Arbeitspaket 3 werden unter der Federführung der Sphera Solutions GmbH gemeinsam mit der SSB AG durchgeführt. In diesem Arbeitspaket finden das kontinuierliche Betriebsmonitoring der Tankstelle mit einer anschließenden technologisch-wirtschaftlichen Bewertung des Wasserstoffversorgungskonzepts statt. Darüber hinaus wird ein Lastenheft als Vorbereitung der nächsten Ausbaustufe einer Wasserstoffversorgungsinfrastruktur von bis zu 50 Brennstoffzellenbussen erarbeitet.

Im Arbeitspaket 4 finden das Projektmanagement und der Wissenstransfer statt. Die Aktivitäten der SSB in diesem Arbeitspaket werden von Sphera unterstützt.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die SSB AG verfügt über umfassende Erfahrungen aus Demonstrationsvorhaben mit innovativen Busantriebstechnologien.

Die ersten Erfahrungen mit Brennstoffzellenbussen sammelte die SSB im EU-Projekt CUTE 2001 bis 2006[1]. Bis Ende 2009 wurden in CUTE und HyFLEET:CUTE[2] mehr als 8,5 Millionen Passagiere weltweit befördert. Dabei ersetzten über 555 Tausend Kilogramm Wasserstoff mehr als 1 Million Liter Diesel. Das EU-Projekt CHIC[3] ist das Dritte einer Folge von Projekten, in denen Wasserstoff als Kraftstoff im ÖPNV eingesetzt und optimiert wurde.

Das im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff (NIP) 2012 bis 2016 geförderte Projekt S-presso[4] diente der Anschaffung und langjährigen Erprobung von vier Bussen mit Brennstoffzellen-Hybridantrieb in einem regulären Liniendienst in Stuttgart und Fellbach. Erkenntnisse aus dem Projekt betreffen die zufriedenstellende Marktreife und Effizienz der Busse im Linienbetrieb. Hinsichtlich der Infrastruktur und Busverfügbarkeit wurden bedeutende Informationen gewonnen: Von den zur Betankung der Fahrzeuge verwendeten Komponenten gehen signifikante Risiken für den Fahrzeugbetrieb aus, die näher untersucht werden müssen und durch technische und organisatorische Maßnahmen zu verbessern sind.

[1] - vgl. https://cordis.europa.eu/project/id/NNE5-113-2000/de

[2] - vgl. https://cordis.europa.eu/project/id/19991; https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/history-fuel-cell-electric-buses/hyfleet-cute-2006-2009

[3] - vgl. https://cordis.europa.eu/project/id/256848

[4] - vgl. https://www.now-gmbh.de/projektfinder/weitere-s-presso/

Mit Hilfe von Clean Energy Partnership[1] (CEP) erfolgt in letzten Jahren eine zunehmende Erweiterung des Wasserstofftankstellen-Netzes. Mithilfe von ersten errichteten Wasserstofftankstellen, die hauptsächlich als Pilotanlagen zur Erprobung von Wasserstofftechnologien betrieben wurden, konnten Komponenten mit geringer Marktreife und die daraus resultierenden Störungen identifiziert werden.

Bis heute gibt es allerdings noch wenige Verkehrsunternehmen, die über eine hauseigene Wasserstofftankstelle verfügen. Dieses Betriebsmodell nimmt jedoch verstärkt an Bedeutung zu, da es ermöglicht Kostenreduktionspotenziale auszuschöpfen und versorgungstechnische und wirtschaftliche Abhängigkeiten von ggf. nur einem Wasserstoffzulieferer durch die Einbindung und Förderung verschiedener Industrieteilnehmer zu senken.

Im EU-Projekt NewBusFuel[2] (FCH JU) erarbeiteten Busbetreiber zusammen mit Industriepartnern Strategien, um eine signifikante Anzahl an Brennstoffzellenbussen in der Flotte zu nutzen. Im Hinblick auf die spezifischen Anforderungen wurden die technologischen Maßnahmen bewertet und großmaßstäbliche Lösungen entwickelt. Die Lösung für den innerstädtischen Stuttgarter Busverkehr mit Brennstoffzellenbussen sieht eine Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse und Nutzung regional erzeugten Stroms aus erneuerbaren Energien vor.

Alle diese Erkenntnisse lagen der Konzeption der Wasserstofftankstelle im Rahmen dieses Projektes[3] zugrunde.

4.1 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die benutzt wurden

Innerhalb des Projektes sollen Erfahrungen mit dem Betrieb der hauseigenen Wasserstofftankstelle zur Befüllung der Brennstoffzellenbusse gewonnen und mit Erkenntnissen aus den bereits durchgeführten Forschungs- und Demonstrationsprojekten zusammengeführt werden. Dabei ist zielführend, Erkenntnisse aus dem umfänglich erfolgten Ausbau des Erdgastankstellennetzes einzubeziehen, um die innovativen Elemente der Wasserstoffinfrastruktur wirtschaftlich und zuverlässig zu gestallten.

[1] - vgl. https://cleanenergypartnership.de/

[2] - vgl. https://cordis.europa.eu/project/id/671426

[3] - vgl. https://www.now-gmbh.de/projektfinder/wabe/

4.2 Verwendete Fachliteratur sowie Informations- und Dokumentationsdienste

Im Laufe des Projektes wird auf eigenes Fachwissen, eigene praktische Erfahrungen und allgemein gängiges Wissen zurückgegriffen.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Verwendungsempfänger: Stuttgarter Straßenbahnen AG (SSB)

Die Stuttgarter Straßenbahnen AG[1] ist eines der größeren und modernsten Verkehrsunternehmen Deutschlands. Das Unternehmen sorgt seit über 150 Jahren für die Mobilität in der Landeshauptstadt Stuttgart und setzt auf nachhaltige Antriebstechnik für ein besseres Klima. 269 Busse - davon 160 emissionsarme Busse - und 209 Bahnen befahren auf 66 Linien 800 Streckenkilometer in Stuttgart und Umgebung. Über 3.200 Mitarbeiter/-innen kümmern sich täglich um rund 617.000 Fahrgäste.

Lieferant: Schwelm Anlagentechnik GmbH

Die Schwelm Anlagentechnik GmbH[2] (SAT) ist ein Unternehmen in Nordrhein-Westfalen, das sich seit Jahren aktiv mit der Planung, Errichtung und Inbetriebsetzung zahlreicher Betankungseinrichtungen für gasförmige Kraftstoffe beschäftigt und die Erfahrungen und Kenntnisse aus der Errichtung von über 450 öffentlichen Erdgastankstellen verfügt.

Neben der Produktion der Neuanlagen spielt auch mittlerweile der Service mit über 300 Wartungsverträgen in den Bereichen Chemie, Erdgas und Biogas eine wichtige Rolle im Unternehmen.

Unterauftragnehmer: Sphera Solutions GmbH

Die Sphera Solutions GmbH (vormals thinkstep AG) mit ihrem Standort in Stuttgart (Leinfelden-Echterdingen) gehört zu Sphera Company[3].

Das Unternehmen hat eine global führende Rolle in der Kombination von Lösungen für integrierte Produkt-Nachhaltigkeitsbewertung ‘LCA for Experts’ zusammen mit der weltweit

[1] - vgl. https://www.ssb-ag.de/

[2] - vgl. https://www.schwelm-at.de

[3] - vgl. https://sphera.com

ausgebauten Nachhaltigkeitsdatenbank ‘Managed LCA Content‘ (MLC)[1], begleitet von fundierten Beratungsleistungen.

Mit über 30 Jahren Erfahrung bietet Sphera eine exzellente Grundlage, dass ihre mehr als 7 Tausend Kunden und über 1 Million Softwarenutzer in mehr als 80 Ländern produktiver und nachhaltiger werden können.

II. Eingehende Darstellung

1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Zuwendung wurde gemäß den vorgegebenen Zielen verwendet. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

1.1 Beschaffung & Inbetriebnahme

Um eine eigene Wasserstofftankstelle direkt am Busbetriebshof in Stuttgart-Gaisburg[2] im Rahmen dieses Projektes zu errichten und diese für die Versorgung der eigenen Brennstoffzellenbusse mit gasförmigem Wasserstoff als Kraftstoff zu erproben, entwickelte SSB ein Konzept für die Betriebshoftankstelle. Dabei wurden die folgenden Anforderungen berücksichtigt:

- Wasserstofftankanlage ohne eigene Produktion des Wasserstoffs vor Ort (EEG, BImSchG, Platzbedarf, etc.),
- hohe Verfügbarkeit der Tankstelle,
- Absicherung der Wasserstoffqualität,
- Tankkupplung ohne IR Kommunikation,
- Fahrzeugerdung über Abstellfläche (nicht über Kabel),
- Integration in Betriebsablauf (Annäherung),
- Betankung ohne Gegendruck[3] bis ca. 25 bar als Sonderfunktion (max. 3bar/min),
- Versorgungssicherheit vergleichbar zur Dieselbelieferung.

[1] - vgl. https://sphera.com/life-cycle-assessment-lca-database/

[2] - Wasserstoffgas-Füllanlage mit Zapfsäule und Wasserstoffbevorratung; Belieferung durch Lkw

[3] - Erstbefüllung

Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung der erarbeiteten Konzeption der Wasserstoffbetriebshoftankstelle.

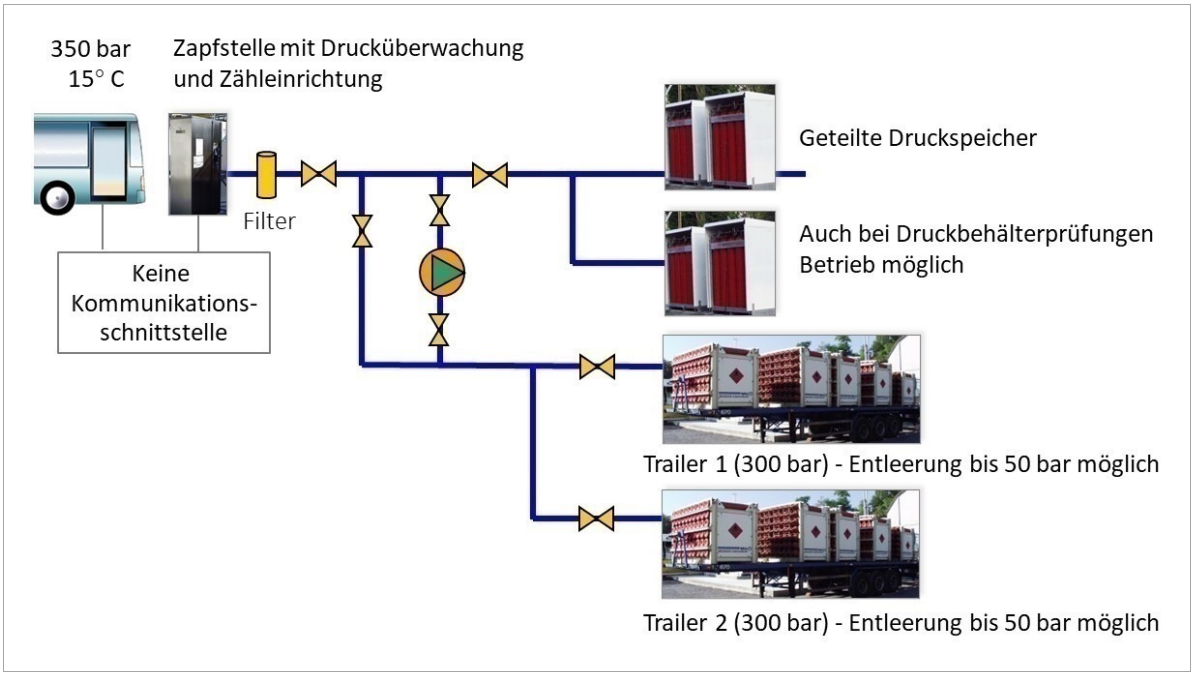


Abbildung 2: Konzeption der Wasserstoffbetriebshoftankstelle

Nach dem Zuwendungsbescheid vom 29.11.2018 wurde unverzüglich mit der Vorbereitung des Projektes begonnen und das Projekt startete am 01.01.2019.

Gleich nach dem Projektstart fand ein Kick-off-Meeting statt, in dem Vertreter der SSB und Schwelm Anlagentechnik die Vorgehensweise zur Errichtung der Wasserstoffbetriebshoftankstelle besprachen. Anschließend erfolgten Einholung von Angeboten, Verhandlungen, Besprechungen, Beauftragungen, Einleitung der Genehmigungsverfahren usw.

Die Entwurfs- und Genehmigungsplanung der Wasserstoffbetriebshoftankstelle ist in Abbildung 3 dargestellt und verdeutlicht die Aufstellorte der Wasserstofftankstelle mit E-Raum, Verdichterraum und Speicher. Im Plan sind die Trailer-Stellflächen und die neue Anordnung der Pkw-Stellplätze markiert.

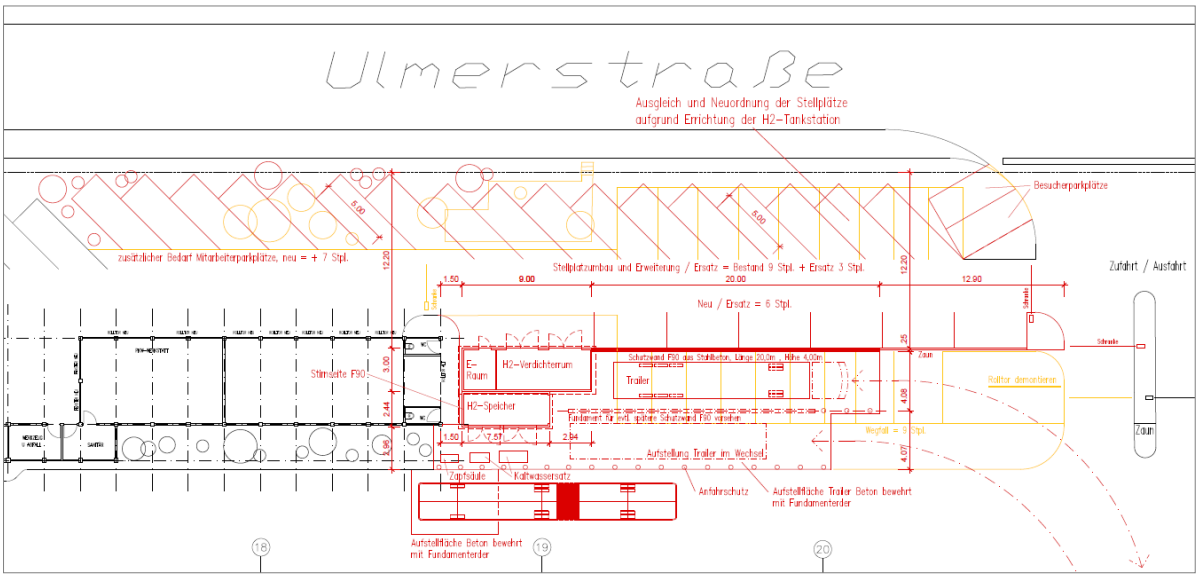


Abbildung 3: Entwurfs- und Genehmigungsplanung der Wasserstoffbetriebshoftankstelle in Stuttgart-Gaisburg

In der zweiten Jahreshälfte 2019 wurden die vom Hersteller Schwelm Anlagentechnik vormontierten Anlagekomponenten vor Ort beim Hersteller abgenommen. SSB beauftragte die TÜV SÜD Industrie Service GmbH, einen Prüfbericht gemäß § 18 (3) zu erstellen.

Der erstellte Prüfbericht (vgl. Abbildung 4) kommt zum Ergebnis, dass die geplante Füllanlage hinsichtlich Aufstellung, Bauart und Betriebsweise den Anforderungen der Betriebssicherheitsverordnung und hinsichtlich des Brand- und Explosionsschutzes auch der Gefahrstoffverordnung entspricht. Die vorgesehenen sicherheitstechnischen Maßnahmen sind als geeignet bewertet und die Anlage kann bei Prüfungseinhaltung sicher betrieben werden.

Darüber hinaus erfolgte die Erstellung des Bauantrages. Es wurden Umlaufverfahren für die Bauauflagen bei den städtischen Ämtern angestoßen, Rohbauarbeiten ausgeschrieben und vergeben. Den Zuschlag für die Rohbauarbeiten erhielt die Firma Gottlob Brodbeck GmbH & Co. KG mit Sitz in Metzingen.

In den Ausführungsplan der Wasserstoffbetriebshoftankstelle wurden Änderungen der Leitungstrassen eingearbeitet und dieser wurde um weitere Planungsdetails ergänzt (vgl. Abbildung 5).

Bericht-Nr.: 20387398/1

TÜV SÜD Industrie Service

Mehr Wert. Mehr Vertrauen.

Prüfbericht

gemäß § 18 Betriebssicherheitsverordnung zur Errichtung und zum Betrieb einer Füllanlage zur Befüllung von Landfahrzeugen (Busse) mit Wasserstoff

1	Antragsgegenstand:	Anlage zur Füllung von verdichtetem Wasserstoff aus GH2-Lagerbehältern in Druckgasbehälter (Fahrzeugbehälter für CGH2) bis zu 350 bar
2	Antragssteller:	Stuttgarter Straßenbahnen AG (SSB) Schockenriedstraße 50 70565 Stuttgart
3	Aufstellungsort:	SSB Betriebshof Gaisburg Ulmer Str. 140 70188 Stuttgart

Datum: 22.08.2019

Unsere Zeichen: IS-AN1-STG

Das Dokument besteht aus 13 Seiten. Seite 1 von 13

Die auszugsweise Wiedergabe des Dokumentes und die Verwendung zu Werbezwecken bedürfen der schriftlichen Genehmigung der TÜV SÜD Industrie Service GmbH.

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfgegenstände.

Bearbeitung: Dipl.-Ing. U. Münter

Datum: 22. August 2019

ISO 9001

Sitz: München
Amtsgericht München HRB 96 869
USt-IdNr. DE129484218
Informationen gemäß § 2 Abs. 1 DL-InfoV unter www.tuev-sued.de/impressum

Aufsichtsrat:
Reiner Block (Vors.)
Geschäftsführer:
Ferdinand Neuwieser (Sprecher),
Christian Bauerschmidt, Thomas Kainz

Telefon: +49 711 7005-0
Telefax: +49 711 7005-611
www.tuev-sued.de/is

TÜV SÜD Industrie Service GmbH
Niederlassung Stuttgart
Abteilung Anlagensicherheit
Gottlieb-Daimler-Str. 7
70794 Filderstadt
Deutschland

Abbildung 4: Prüfbericht gemäß § 18 Betriebssicherheitsverordnung

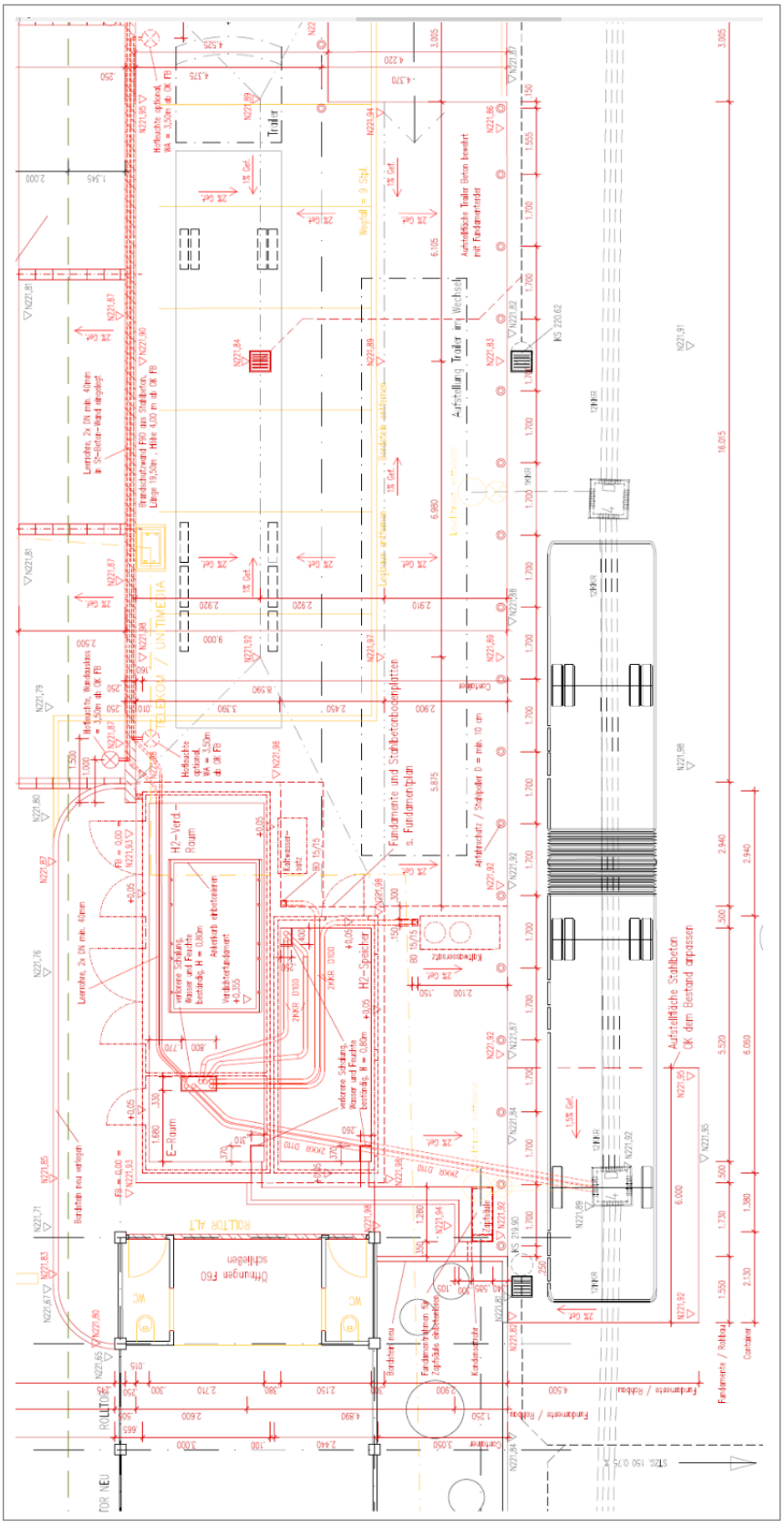


Abbildung 5: Ausführungsplan der Wasserstoffbetriebshoftankstelle

Nach der Erteilung der Baugenehmigung von der Stadt begann die Firma Gottlob Brodbeck im Februar 2020 mit der Durchführung der Rohbauarbeiten, die bis Juni 2020 dauerten (vgl. Abbildung 6 bis Abbildung 8). Es wurden Strom- und Versorgungsleitungen verlegt, das Fundament für die Wasserstofftankstelle errichtet und eine 4 Meter hohe und 20 Meter lange Explosionsschutzwand erbaut.

Abbildung 6: Erstellung der Bohrpfähle für das Fundament der Kompressor-Station

Abbildung 7: Errichtung der Brandschutzwand

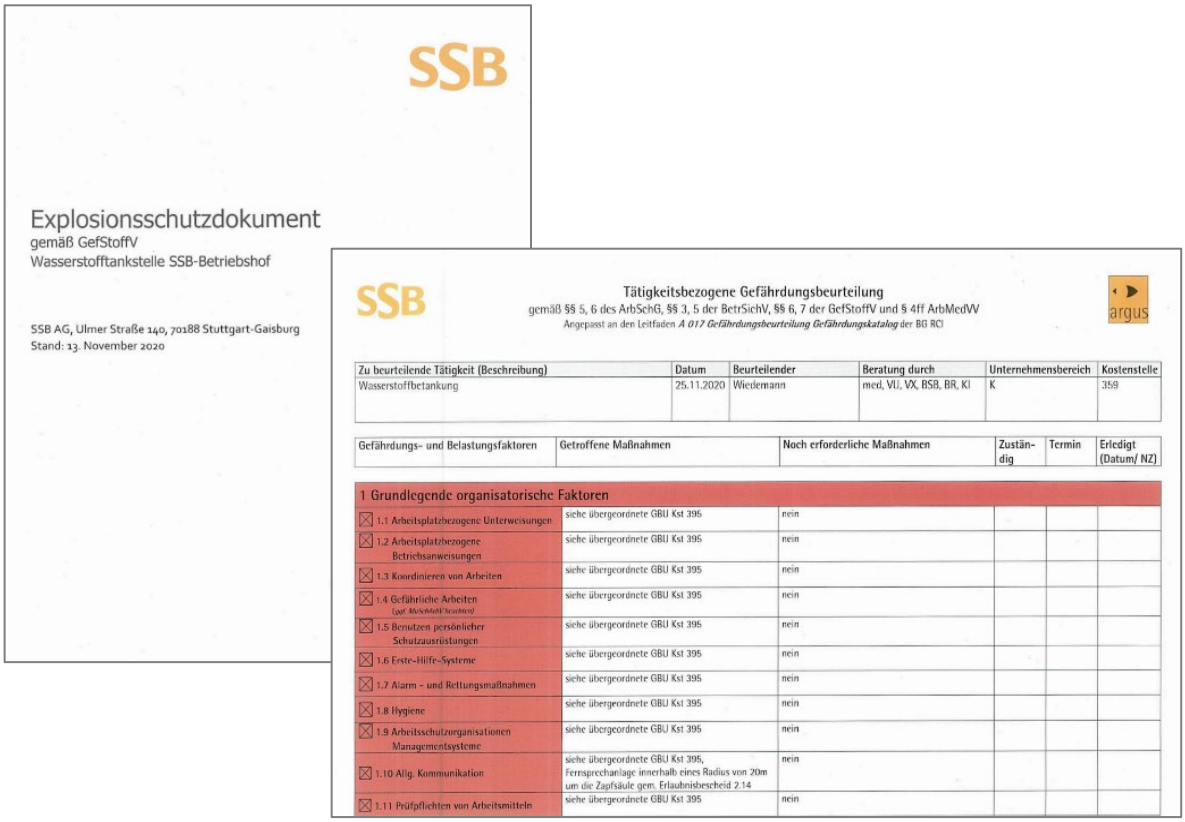
Abbildung 8: Fertiggestellter Rohbau

Des Weiteren kam es zu einer Verzögerung bei der Projektbearbeitung. Aufgrund der Corona-Krise konnte der Hersteller die Rohre und einige der Hochdruck-Komponenten nicht wie geplant aus China beziehen, sondern griff auf andere Lieferanten mit erheblich längerer Lieferzeit und höheren Preisen zurück. Darüber hinaus ergab sich ein Mehraufwand im Engineering und in der Fertigung, da sich bei der Wasserstofftankstellenanlage um einen Prototyp handelt. Der Verdichter wurde später als geplant geliefert, da der Hersteller kurzfristig erfuhr, dass der Verdichter im Stillstand nahezu drucklos gemacht werden sollte, um die Membrane nicht zu schädigen bzw. um die Standzeit der Membrane zu verbessern. Deshalb waren Anpassungen notwendig. Schwelm Anlagentechnik nahm eine erneute Anpassung des Designs vor, konzipierte und setzte mechanisch eine weitere interne Entspannung um, damit keine nennenswerten Wasserstoffmengen abgeblasen werden müssen. Durch diese Änderungen an gefertigten Komponenten konnten die laufenden Betriebskosten der Anlage gesenkt werden.

Die Vorbereitung der Inbetriebnahme beinhaltete im Einzelnen folgende Inhalte:

- Prüfbericht gem. §18 Betriebssicherheitsverordnung (TÜV Süd),
- Prüfbescheinigung Druckgeräte vor Inbetriebnahme nach §15 BetrSichV (TÜV Süd),
- Explosionsschutzdokument gem. GefStoffV,
- Aufstellplan der Anlage und Komplettdokumentation der Anlage (Schwelm),
- Gefährdungsbeurteilung,
- Erdungsdokumente,
- Feuerwehrplan nach DIN 14095 der Liegenschaft,
- Ausbildung und Unterweisung des Bedienungs- und Instandhaltungspersonals (Einweisungsnachweis der Mitarbeiter, Bedienungsanleitungen)

Nachfolgend sind beispielhaft das erstellte Explosionsschutzdokument gemäß GefStoffV und die Tätigkeitsbezogene Gefährdungsbeurteilung gemäß §§ 5, 6 des ArbSchG, §§ 3, 5 der BetrSichV, §§ 6, 7 der GefStoffV und § 4ff ArbMedW dargestellt.



SSB

Explosionsschutzdokument
gemäß GefStoffV
Wasserstofftankstelle SSB-Betriebshof

SSB AG, Ulmer Straße 140, 70188 Stuttgart-Gaisburg
Stand: 13. November 2020

SSB

Tätigkeitsbezogene Gefährdungsbeurteilung
gemäß §§ 5, 6 des ArbSchG, §§ 3, 5 der BetrSichV, §§ 6, 7 der GefStoffV und § 4ff ArbMedVV
Angepasst an den Leitfaden *A 017 Gefährdungsbeurteilung Gefährdungskatalog* der BG RCI

argus

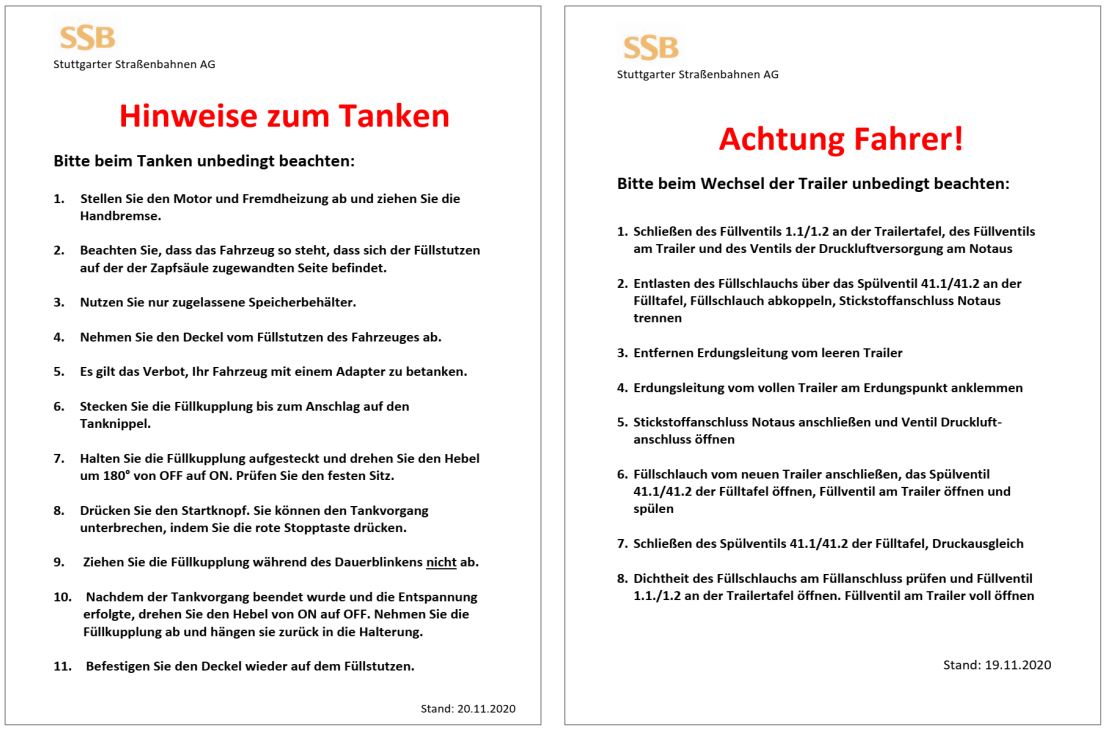
Zu beurteilende Tätigkeit (Beschreibung)	Datum	Beurteilender	Beratung durch	Unternehmensbereich	Kostenstelle
Wasserstoffbetankung	25.11.2020	Wiedemann	med, VU, VX, BSB, BR, KI	K	359

Gefährdungs- und Belastungsfaktoren	Getroffene Maßnahmen	Noch erforderliche Maßnahmen	Zustän-dig	Termin	Erledigt (Datum/ NZ)
1 Grundlegende organisatorische Faktoren					
☒ 1.1 Arbeitsplatzbezogene Unterweisungen	siehe übergeordnete GBU Kst 395	nein			
☒ 1.2 Arbeitsplatzbezogene Betriebsanweisungen	siehe übergeordnete GBU Kst 395	nein			
☒ 1.3 Koordinieren von Arbeiten	siehe übergeordnete GBU Kst 395	nein			
☒ 1.4 Gefährliche Arbeiten (gef. Mischbetrieb)	siehe übergeordnete GBU Kst 395	nein			
☒ 1.5 Benutzen persönlicher Schutzausrüstungen	siehe übergeordnete GBU Kst 395	nein			
☒ 1.6 Erste-Hilfe-Systeme	siehe übergeordnete GBU Kst 395	nein			
☒ 1.7 Alarm - und Rettungsmaßnahmen	siehe übergeordnete GBU Kst 395	nein			
☒ 1.8 Hygiene	siehe übergeordnete GBU Kst 395	nein			
☒ 1.9 Arbeitsschutzorganisationen Managementsysteme	siehe übergeordnete GBU Kst 395	nein			
☒ 1.10 Allg. Kommunikation	siehe übergeordnete GBU Kst 395, Fernsprechanlage innerhalb eines Radius von 20m um die Zapfsäule gem. Erlaubnisbescheid 2.14	nein			
☒ 1.11 Prüfpflichten von Arbeitsmitteln	siehe übergeordnete GBU Kst 395	nein			

Abbildung 9: Explosionsschutzdokument und tätigkeitsbezogene Gefährdungsbeurteilung

Das Bedienungs- und Instandhaltungspersonal wurde in die Bedienung der Wasserstofftankstelle ordnungsgemäß eingewiesen und es wurden Bedienungsanleitungen erstellt. In Abbildung 10 sind beispielhaft die Anleitungen für das Tanken und den Auflieger Wasserstoffanlieferung dargestellt.

Die Prüfung vor Inbetriebnahme erfolgte ohne Mängelfeststellung und die Tankstelle konnte im November 2020 in Betrieb genommen werden (vgl. Abbildung 11). Durch Eröffnung der eigenen Wasserstofftankstelle am Busbetriebshof in Stuttgart-Gaisburg ist die Zeit beendet, in der die vier Brennstoffzellenbusse der SSB von Gaisburg aus für jede Betankung zum Stuttgarter Flughafen gefahren werden mussten.



SSB
Stuttgarter Straßenbahnen AG

Hinweise zum Tanken

Bitte beim Tanken unbedingt beachten:

1. Stellen Sie den Motor und Fremdheizung ab und ziehen Sie die Handbremse.
2. Beachten Sie, dass das Fahrzeug so steht, dass sich der Füllstutzen auf der der Zapfsäule zugewandten Seite befindet.
3. Nutzen Sie nur zugelassene Speicherbehälter.
4. Nehmen Sie den Deckel vom Füllstutzen des Fahrzeuges ab.
5. Es gilt das Verbot, Ihr Fahrzeug mit einem Adapter zu betanken.
6. Stecken Sie die Füllkupplung bis zum Anschlag auf den Tanknippel.
7. Halten Sie die Füllkupplung aufgesteckt und drehen Sie den Hebel um 180° von OFF auf ON. Prüfen Sie den festen Sitz.
8. Drücken Sie den Startknopf. Sie können den Tankvorgang unterbrechen, indem Sie die rote Stopptaste drücken.
9. Ziehen Sie die Füllkupplung während des Dauerblinkens nicht ab.
10. Nachdem der Tankvorgang beendet wurde und die Entspannung erfolgte, drehen Sie den Hebel von ON auf OFF. Nehmen Sie die Füllkupplung ab und hängen sie zurück in die Halterung.
11. Befestigen Sie den Deckel wieder auf dem Füllstutzen.

Stand: 20.11.2020

SSB
Stuttgarter Straßenbahnen AG

Achtung Fahrer!

Bitte beim Wechsel der Trailer unbedingt beachten:

1. Schließen des Füllventils 1.1/1.2 an der Trailertafel, des Füllventils am Trailer und des Ventils der Druckluftversorgung am Notaus
2. Entlasten des Füllschlauchs über das Spülventil 41.1/41.2 an der Fülltafel, Füllschlauch abkoppeln, Stickstoffanschluss Notaus trennen
3. Entfernen Erdungsleitung vom leeren Trailer
4. Erdungsleitung vom vollen Trailer am Erdungspunkt anklemmen
5. Stickstoffanschluss Notaus anschließen und Ventil Druckluft-anschluss öffnen
6. Füllschlauch vom neuen Trailer anschließen, das Spülventil 41.1/41.2 der Fülltafel öffnen, Füllventil am Trailer öffnen und spülen
7. Schließen des Spülventils 41.1/41.2 der Fülltafel, Druckausgleich
8. Dichtheit des Füllschlauchs am Füllanschluss prüfen und Füllventil 1.1./1.2 an der Trailertafel öffnen. Füllventil am Trailer voll öffnen

Stand: 19.11.2020

Abbildung 10: Bedienungsanleitungen für das Tanken und den Auflieger der Wasserstoff-anlieferung

Abbildung 11: Wasserstoffbetriebshoftankstelle in Stuttgart-Gaisburg

1.2 Betrieb & Wartung

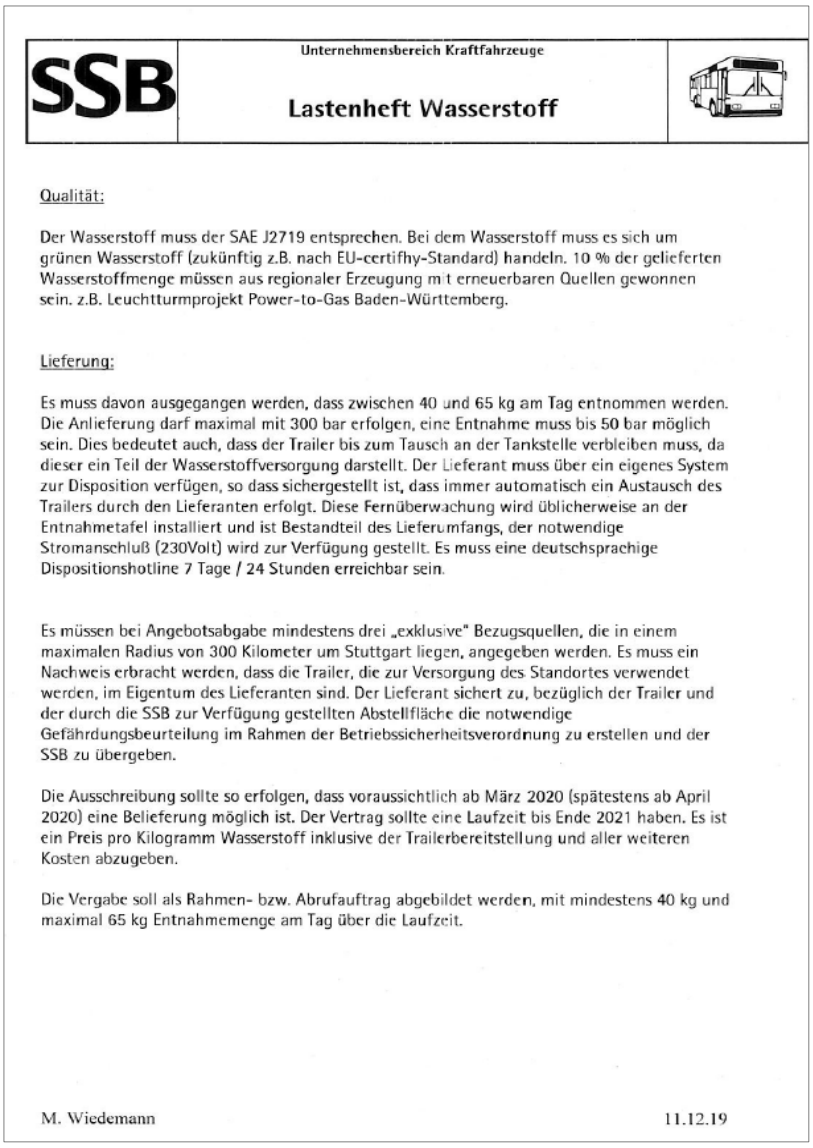
Zur Vorbereitung des Betriebs der Tankstelle wurden mehrere Angebote von Wasserstofflieferanten mit aktiver Unterstützung von Sphera eingeholt. Die Erstellung des Lastenheftes für die Wasserstofflieferung (vgl. Abbildung 12) erfolgte ebenfalls in Zusammenarbeit mit Sphera. Die Ausschreibung wurde Anfang 2020 durchgeführt.

Bei der Lieferung des Wasserstoffs wird großer Wert darauf gelegt, dass der Wasserstoff aus regenerativen Quellen erzeugt und in der Region hergestellt wird. Mindestens 10% des Wasserstoffs soll aus diesen Quellen stammen. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Querverbindung zu anderen auf regionale und regenerative Wasserstoffherstellung aufbauenden Projekten.

Als Wasserstofflieferant wurde die Firma Air Liquide GmbH[1], die seit dem Jahr 2012 rund 30 Wasserstofftankstellen deutschlandweit gebaut hat, ausgewählt.

Der Wasserstoff (H_2) wird in Trailern angeliefert. Der Trailer bleibt als Bestandteil der Anlage vor Ort und wird nicht abgepumpt. Die Wasserstofftankstellenanlage verfügt über zwei Stellplätze für Trailer (vgl. Abbildung 13). Dabei ist immer nur ein Trailer druckfest an das System der Anlage angeschlossen. Aus dem Tank des Trailers wird H_2 dem Gasspeicher bzw. über die Zapfsäule dem Fahrzeugtank zugeführt. Wenn der Druck im Tank des Trailers das Minimum-Niveau erreicht hat, erfolgt der Tausch. Zur sicheren Positionierung sind die Trailer-Stellplätze mit Führungsschienen bzw. Rammschutzbalken ausgestattet.

[1] - vgl. https://industrie.airliquide.de



SSB

Unternehmensbereich Kraftfahrzeuge

Lastenheft Wasserstoff

Qualität:

Der Wasserstoff muss der SAE J2719 entsprechen. Bei dem Wasserstoff muss es sich um grünen Wasserstoff (zukünftig z.B. nach EU-certifhy-Standard) handeln. 10 % der gelieferten Wasserstoffmenge müssen aus regionaler Erzeugung mit erneuerbaren Quellen gewonnen sein. z.B. Leuchtturmprojekt Power-to-Gas Baden-Württemberg.

Lieferung:

Es muss davon ausgegangen werden, dass zwischen 40 und 65 kg am Tag entnommen werden. Die Anlieferung darf maximal mit 300 bar erfolgen, eine Entnahme muss bis 50 bar möglich sein. Dies bedeutet auch, dass der Trailer bis zum Tausch an der Tankstelle verbleiben muss, da dieser ein Teil der Wasserstoffversorgung darstellt. Der Lieferant muss über ein eigenes System zur Disposition verfügen, so dass sichergestellt ist, dass immer automatisch ein Austausch des Trailers durch den Lieferanten erfolgt. Diese Fernüberwachung wird üblicherweise an der Entnahmetafel installiert und ist Bestandteil des Lieferumfangs, der notwendige Stromanschluß (230Volt) wird zur Verfügung gestellt. Es muss eine deutschsprachige Dispositionshotline 7 Tage / 24 Stunden erreichbar sein.

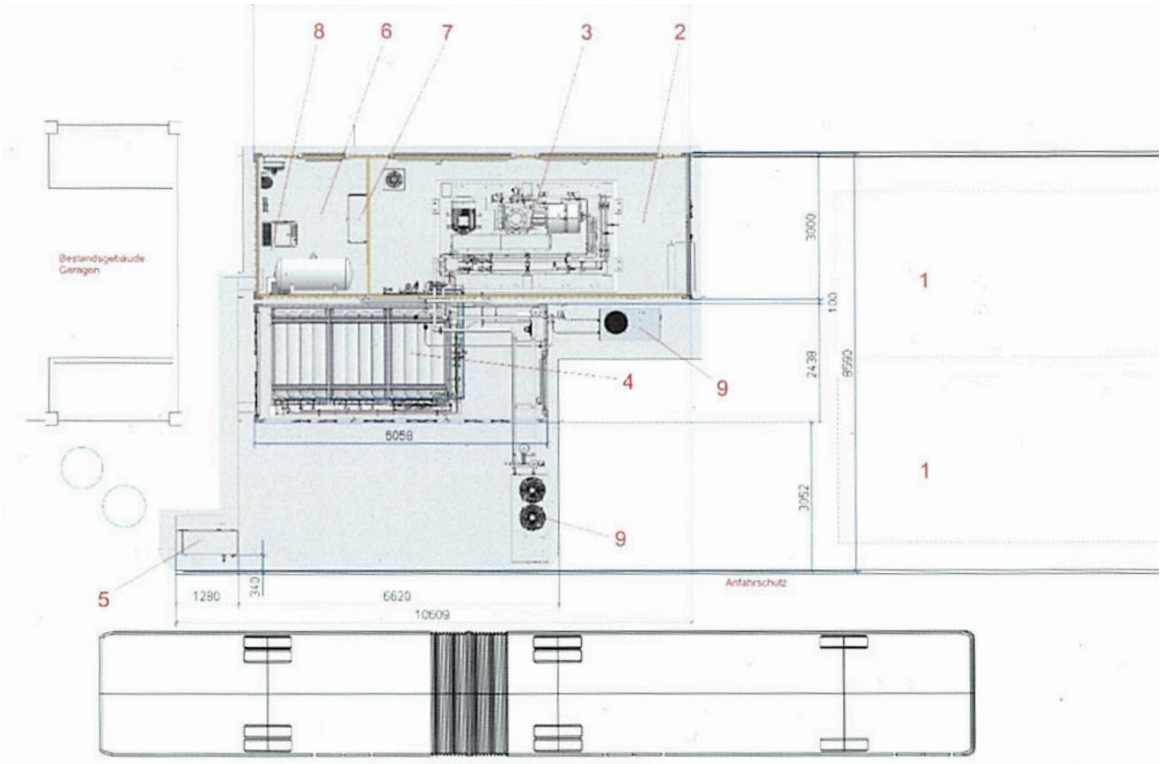
Es müssen bei Angebotsabgabe mindestens drei „exklusive" Bezugsquellen, die in einem maximalen Radius von 300 Kilometer um Stuttgart liegen, angegeben werden. Es muss ein Nachweis erbracht werden, dass die Trailer, die zur Versorgung des Standortes verwendet werden, im Eigentum des Lieferanten sind. Der Lieferant sichert zu, bezüglich der Trailer und der durch die SSB zur Verfügung gestellten Abstellfläche die notwendige Gefährdungsbeurteilung im Rahmen der Betriebssicherheitsverordnung zu erstellen und der SSB zu übergeben.

Die Ausschreibung sollte so erfolgen, dass voraussichtlich ab März 2020 (spätestens ab April 2020) eine Belieferung möglich ist. Der Vertrag sollte eine Laufzeit bis Ende 2021 haben. Es ist ein Preis pro Kilogramm Wasserstoff inklusive der Trailerbereitstellung und aller weiteren Kosten abzugeben.

Die Vergabe soll als Rahmen- bzw. Abrufauftrag abgebildet werden, mit mindestens 40 kg und maximal 65 kg Entnahmemenge am Tag über die Laufzeit.

M. Wiedemann 11.12.19

Abbildung 12: Lastenheft für die Wasserstofflieferung



1. Stellplätze für Trailer
2. Verdichterraum
3. Wasserstoffverdichter
4. Wasserstoffspeicher
5. Zapfsäule
6. Elektroraum
7. Schaltschrank
8. Druckluftanlage
9. Kaltwassersatz

Abbildung 13: Komponenten der Wasserstofftankstelle

In dem schallschutzisolierten Verdichterraum befinden sich der Anlagenkompressor und Nebenanlagen (Hydraulik und Gaskühlung). Es gibt eine Gaswarnanlage, die bei Erreichen von 20 % der Unteren Explosionsgrenze (UEG) einen Voralarm auslöst und die Lüftung im Raum startet bzw. bei Erreichen von 40% der UEG den gesamten Verdichterraum stromlos schaltet und die H_2-Zufuhr absperrt. Für die verschiedenen Druckstufen sind in der Anlage jeweils Sicherheitsventile vorhanden, deren Ableitung über einen Abblasekamin erfolgt. Die Container und die Abblaseleitung sind mit einer Blitzschutzeinrichtung versehen.

Der Gasspeicher und die Gasverteilung sind im kleinen Stahlcontainer untergebracht. Der Gasspeicher selbst besteht aus drei einzelnen Racks mit je 28 Speicherflaschen, die über Rohrleitungen und Armaturen miteinander zu einem gemeinsamen Speicher verrohrt sind. Der Container ist mit einer Lüftung ausgestattet und verfügt auf der Stirnseite über eine Brandschutzwand.

Im Elektroraum sind die Schaltschränke zur Anlagensteuerung und die Drucklufterzeugung untergebracht. Der Elektroraum ist isoliert, mit einer Lüftung ausgestattet und durch eine gasdichte Wand von dem Verdichterraum abgetrennt.

Die Zapfsäule zur Betankung besteht aus einem unteren und einem oberen Stahlblechgehäuse, die durch einen seitlichen Ständer miteinander verbunden sind. Für Montage- und Wartungszwecke sind verschließbare Türen vorgesehen. Im unteren Gehäuse sind die gasführenden Rohrleitungen mit Armaturen, Massendurchflussmesser und Druckmesssensor und weitere Ausrüstungsteile für einen Füllanschluss untergebracht. Der Füllanschluss der Zapfsäule ist durch die Einhängevorrichtung am Ständer der Säule positioniert. Die Verbindung von Füllschlauch und Füllrohrleitung an der Zapfsäule erfolgt über eine Abreißkupplung. Der Entspannungsschlauch ist ebenfalls mit einer Abreißkupplung ausgestattet. Der Betankungsbereich vor der Zapfsäule ist leitfähig < io8 Q ausgeführt. Nachdem der Füllschlauch angekuppelt ist, kann der Betankungsvorgang über die Zapfsäule gestartet werden. Das System prüft die Dichtigkeit der Verbindung und den Vordruck des zu betankenden Busses. Dieses System kann für den Fall besonders geringer Wasserstoffdrücke im Speicher des zu betankenden Busses manuell abgeschaltet werden.

Die Betankung findet über das Druckgefälle von den Trailer-Tanks und Speicher zum Tank im Bus statt. Eine direkte Betankung mittels Kompressor ist nicht vorgesehen. Bei der Betankung steigt die Temperatur stark an. Deshalb wird das Gas über die Gaskühlung und die Kaltwassersätze vorgekühlt. Bei Erreichen des maximalen Drucks im Fahrzeug endet die Betankung automatisch. Der Vorgang kann auch manuell unterbrochen bzw. beendet werden. Nach Beendigung der Betankung wird das H_2-Gas, das zwischen dem Tankstutzen und der Kupplung eingeschlossen ist, über die Abblaseleitung abgeführt.

Die Tankstelle wird mit Hilfe einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) überwacht und gesteuert. Die sicherheitstechnischen Überwachungen sind parallel zur SPS hardwaremäßig in „Fail Safe“-Technik ausgeführt und verschaltet. Bei einer Störung wird der Verdichter automatisch abgeschaltet und die fernbetätigte Absperrarmatur vor dem Verdichter über Federkraft geschlossen. Die Anlage ist mit einem Not-Aus-System ausgerüstet. Not-Aus-Taster befinden sich im Elektroraum, Verdichterraum sowie an der Zapfsäule.

1.3 Begleituntersuchungen & technologisch-wirtschaftliche Bewertung

1.3.1 Planung und Vorbereitung

Das Konzept für die Begleituntersuchungen und die technologisch-wirtschaftliche Bewertung umfasst folgende Untersuchungen:

- Festlegung der zu erfassenden Kenngrößen und Durchführung des betrieblichen Monitorings,
- Vergleich mit alternativen Tankstellenkonzepten und bereits existierenden Wasserstofftankstellen,
- Marktstudie im Rahmen einer Versendung eines Request for Information zur Erstellung des Lastenhefts,
- Optimierung der Tankstelle.

Das Konzept wurde von Sphera gemeinsam mit der SSB erarbeitet.

Um die zu erfassenden Kenngrößen für das betriebliche Monitoring zu definieren, führte Sphera eine Recherche durch. Eine Zusammenstellung der relevanten Daten ist Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Zusammenstellung der relevanten Datenpunkte

Daten	Einheit	Erfassungs-häufigkeit	Kommentar/ Definitionen
Tankstelle ID	---	pro Tankvorgang	Kennzeichnung der Tankstelle
Fahrzeug ID	---	pro Tankvorgang	Fahrzeugdaten
Beginn des Betankungsvorgangs	dd:mm:yy hh:mm:ss	pro Tankvorgang	Beginn des Tankvorganges, i.R. eingeleitet durch RFID-Kartendurchzug (oder ähnliches)
Beginn des Füllvorgangs	dd:mm:yy hh:mm:ss	pro Tankvorgang	Beginn des Füllvorgangs (oder Dauer des Füllvorgangs in Sekunden)
Ende des Füllvorgangs	dd:mm:yy hh:mm:ss	pro Tankvorgang	Ende des Füllvorgangs
Tankmenge	kg/Betankung	pro Tankvorgang	Füllmenge für jeden einzelnen Betankungs-vorgang
Druck Fahrzeugtank (Start)	Bar	pro Tankvorgang	Druck im Fahrzeugtank zu Beginn des Füllvorgangs
Druck Fahrzeugtank (Ende)	Bar	pro Tankvorgang	Druck im Fahrzeugtank am Ende des Füll-vorgangs
Temperatur Fahrzeugtank (Start)	°C	pro Tankvorgang	Temperatur im Fahrzeugtank zu Beginn des Füllvorgangs, falls vorhanden
Temperatur Fahrzeugtank (Ende)	°C	pro Tankvorgang	Temperatur im Fahrzeugtank am Ende des Füllvorgangs, falls vorhanden

Daten	Einheit	Erfassungs-häufigkeit	Kommentar/ Definitionen
Kilometerstand des Fahrzeugs	km	pro Tankvorgang	Kilometerstand des Fahrzeugs an der Zapfsäule
Füllvorgang erfolgreich?	Ja / Nein / Unbekannt	pro Tankvorgang	Bitte geben Sie an, ob die Befüllung erfolgreich war (keine technischen Probleme)
Füllvorgang abgeschlossen?	Ja / Nein / Unbekannt	pro Tankvorgang	Bitte geben Sie an, ob die Befüllung vollständig war (SOC=100%, Fahrzeugtank vollständig befüllt)
Lufttemperatur während des Tankvorgangs	°C	pro Tankvorgang	falls vorhanden
Beginn der Ausfallzeit	dd:mm:yy hh:mm:ss	pro Vorkommnis	Beginn der Stillstandzeit
Ende der Ausfallzeit	dd:mm:yy hh:mm:ss	pro Vorkommnis	Ende der Stillstandzeit
Ausfallgrund bzw. Ausfallgründe	---	pro Vorkommnis	Ordnen Sie eine der folgenden Kategorien zu - Geplante Wartung - Außerplanmäßige Wartung (Klassifizierung nach eine oder mehrere der folgenden Kategorien) A - Zapfsäulenanlage, B - Kompressor(en), C - H2-Speicher, D - Elektrische Komponenten, G - Ausfall der H2-Zufuhr, H - Sonstiges.
Meldung von sicherheitsrelevanten Ereignissen	dd/mm/yyyy hh:mm:ss	bei Eintreten	Bitte dokumentieren Sie alle sicherheitsrelevanten Ereignisse zur Leistungsbewertung
H2-Versorgung Datum und Uhrzeit des Tauschs des Trailers	dd/mm/yyyy hh:mm:ss	pro Vorkommnis	Datum inkl. Uhrzeit, an dem der Trailer getauscht wird
H2-Versorgung H2-Menge im neuen Trailer	kg	pro Vorkommnis	Bitte geben Sie die Wasserstoffmenge an, die in dem neuen Trailer gespeichert wird
H2-Versorgung H2-Menge im Trailer nach Tausch	kg	pro Vorkommnis	Menge des Wasserstoffs, die im (getauschten) Trailer verbleibt. Wenn dies nicht messbar, kann berechnet werden
H2-Versorgung H2-Quelle	---	pro Vorkommnis	Herkunft des geleiferten Wasserstoffs
Herkunft des Wasserstoffs	% der erneuerbaren Energien	monatlich	Ziel ist es, die CO2-Emissionen um mindestens 50% zu reduzieren, verglichen mit den Emissionen äquivalenter Diesel-Fahrzeuge, berechnet auf Well-to-Wheel-Basis
Strombedarf Tankstelle	kWh	monatlich	abhängig von den betrieblichen Vereinbarungen
Sonstiger Energiebedarf Tankstelle	abhängig von Energieträgern	monatlich	bei Bedarf
H2 Qualität	% (Reinheitsrad)	jährlich	Ziel ist eine Wasserstoffreinheit von über 99,97 %
TRL Anfang/Mitte/Ende des Projekts	TRL 1-9	jährlich	Technology Readiness Levels (TRL)

1.3.2 Betriebliches Monitoring

Das betriebliches Monitoring gliedert sich in das Monitoring der Wasserstoffverbräuche an der Tankstelle und der Betankungsprozesse der Brennstoffzellenbusse.

Nach der Inbetriebnahme der Wasserstofftankstelle begann im November 2020 das Monitoring der Wasserstoffverbräuche. Jeden Monat wurden die Verbrauchswerte der Tankstelle dokumentiert. Die erfassten monatlichen Verbräuche sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt. Seit der Inbetriebnahme bis Ende 2023 wurden an der Tankstelle die eigenen Brennstoffzellen-Stadtbusse mit insgesamt knapp 21 Tonnen Wasserstoff bei einem Druck von 350 bar betankt.

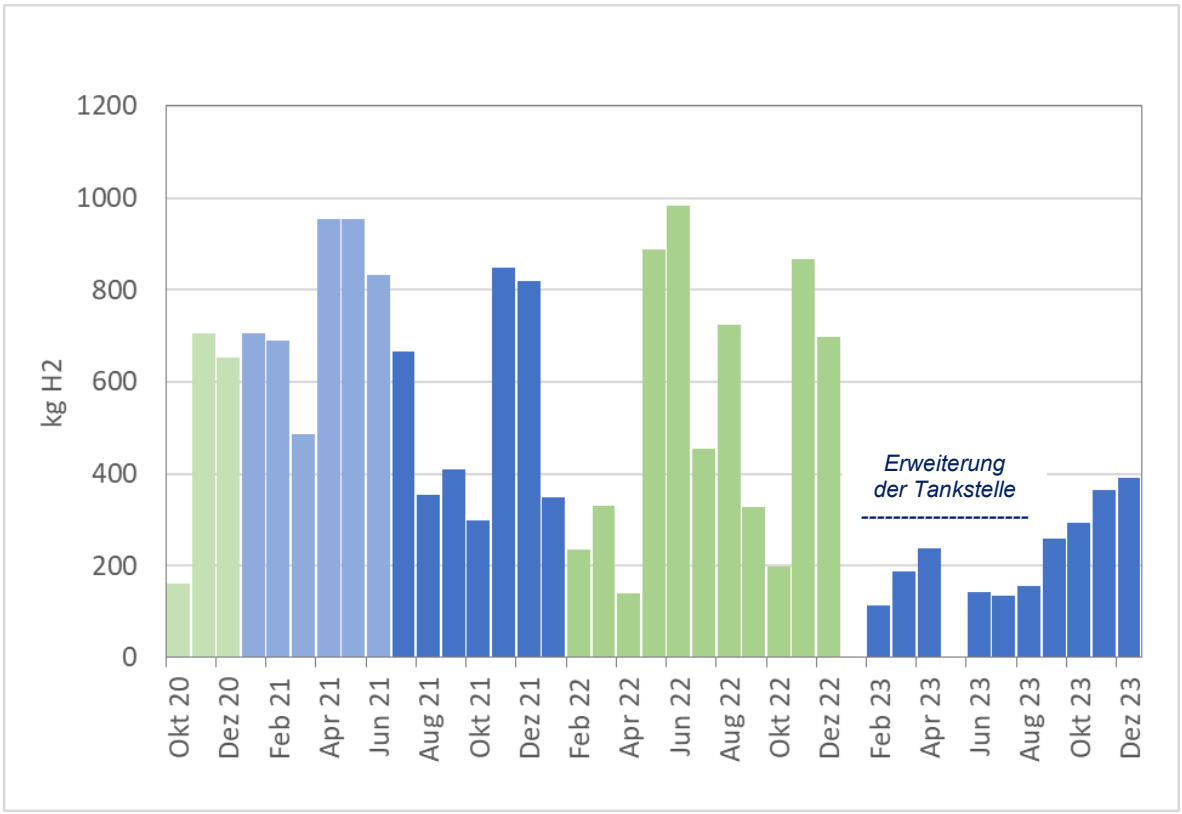


Abbildung 14: Monatliche Wasserstoffverbräuche an der Betriebshoftankstelle

Wie aus Abbildung 14 ersichtlich ist, wurde 2023 weniger Wasserstoff betankt als in den Jahren zuvor. Dies war bedingt durch die Erweiterungsmaßnahmen an der Tankstelle (vgl. Abschnitt 1.3.5) sowie dadurch, dass die Brennstoffzellenbusse aufgrund ihres hohen Alters

(10 Jahre in Betrieb) nicht mehr voll einsatzbar waren und die neu beschafften Brennstoffzellenbusse mit der Bezeichnung H2.City Gold[1] erst im Herbst 2023 geliefert wurden.

Die Auswertung der Verbrauchsdaten zeigt, dass in dem Zeitraum von November 2020 bis Dezember 2022 durchschnittlich 590 kg H_2 pro Monat verbraucht wurde. Der minimale monatliche Verbrauchswert lag bei 140 kg H_2 (April 2022) und der maximale Wert bei 955 kg H_2 (April 2021). Die Daten aus dem Jahr 2023 wurden dabei nicht berücksichtigt, da sich die erwähnten Maßnahmen auf den Betrieb der Tankstelle auswirkten.

Das Monitoring der Betankungsprozesse der Brennstoffzellenbusse begann im April 2021. Für jeden Betankungsvorgang wurden der Kilometerstand, die Wasserstofftankmenge sowie das Kennzeichen des zu betankenden Busses dokumentiert, um die spezifischen Wasserstoffverbräuche einzelner Fahrzeuge ermitteln zu können. Ein Ausschnitt aus der Datenerfassungstabelle zur Betankung der einzelnen Brennstoffzellenbusse ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Auszug aus der Erfassung der Betriebsdaten zur Busbetankung

Datum	Kennzeichen	Kilometerstand	Tankmenge [kg]
01.07.2021	5503	124284	21,25
01.07.2021	5502	162465	8,63
02.07.2021	5503	124519	21,95
02.07.2021	5503	124569	5,62
02.07.2021	5502	162520	5,93
02.07.2021	5503	124679	10,26
03.07.2021	5502	162624	9,76
03.07.2021	5503	124858	17,41
04.07.2021	5502	162742	12,13
04.07.2021	5503	125017	16,73
05.07.2021	5502	162794	5,11
05.07.2021	5504	143067	2,01
05.07.2021	5502	162843	4,48
05.07.2021	5503	125253	21,64

[1] - vgl. https://caetanobus.pt/en/urban-zero-emissions/?produto=h2-city-gold-en

Datum	Kennzeichen	Kilometerstand	Tankmenge [kg]
06.07.2021	5503	125302	6,29
06.07.2021	5503	125350	4,57
06.07.2021	5502	163057	17,85
07.07.2021	5504	143310	21,68
07.07.2021	5502	163108	5,32
07.07.2021	5504	143527	19,89
08.07.2021	5503	125585	21,39
08.07.2021	5504	143744	19,27
09.07.2021	5503	125673	10,43
09.07.2021	5504	143797	6,52
09.07.2021	5502	163461	9,6
09.07.2021	5503	125854	18,48
10.07.2021	5503	125997	16,7
10.07.2021	5504	143898	10,85
10.07.2021	5502	163604	12,51
11.07.2021	5504	144033	11,62
11.07.2021	5503	126133	11,99

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die erfasste Laufleistung und den durchschnittlichen Wasserstoffverbrauch einzelner Fahrzeuge.

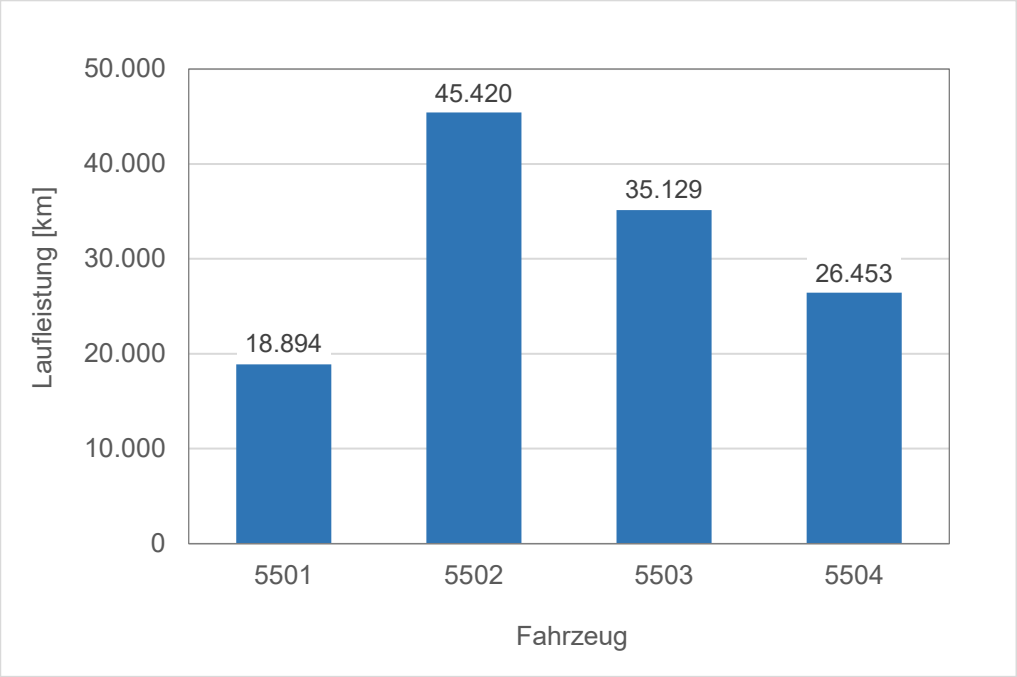


Abbildung 15: Erfasste Laufleistung einzelner Brennstoffzellenbusse

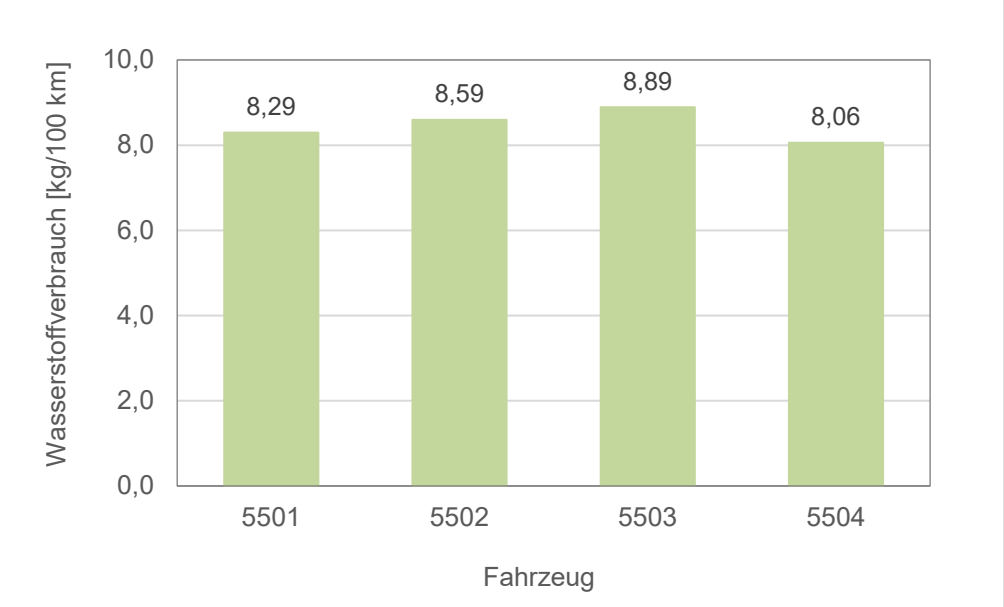


Abbildung 16: Wasserstoffverbräuche einzelner Brennstoffzellenbusse

Wie Abbildung 16 verdeutlicht, verbrauchte der Brennstoffzellenbus mit dem Kennzeichen 5504 im Durchschritt am wenigsten Wasserstoff (8,06 kg/100 km) und der Bus mit dem Kennzeichen 5501 am meistens Wasserstoff (8,89 kg/100 km). Betrachtet man alle vier Brennstoffzellenbusse zusammen (vgl. Tabelle 4) , so lässt sich der Durchschnittsverbrauch von 8,52 kg H_2 /100 km errechnen.

Tabelle 4: Gesamtlaufleistung, Gesamttankmenge und Durchschnittsverbrauch aller Brennstoffzellenbusse

	Laufleistung [km]	Tankmenge [kg H_2]	Durchschnittsverbrauch [kg/100 km]
Alle Busse	125.896	10.725	8,52

1.3.3 Technologisch-wirtschaftliche Bewertung

Im Rahmen der technologisch-wirtschaftlichen Bewertung war ursprünglich geplant einen Vergleich mit bestehenden öffentlichen Wasserstofftankstellen in Stuttgart durchzuführen, namentlich die OMV H_2-Tankstelle am Stuttgarter Flughafen und die EnBW Tankstelle am Stuttgarter Gaskessel in der Talstraße. Bei der H_2-Tankstelle der OMV am Stuttgarter Flughafen handelt es sich um mit die dienstälteste Wasserstofftankstelle in Deutschland, die bereits 2009 in Betrieb genommen wurde. Aufgrund (altersbedingter) technischer Schwierigkeiten war die Tankstelle 2022 und 2023 überwiegend außer Betrieb, so dass hier keine belastbaren Aussagen zum Betrieb oder Betriebskosten gemacht werden können. Weiterhin ergab sich im Dialog mit H2 Mobility als Betreiber der Tankstelle, dass ein techno-ökonomischer Vergleich nicht wirklich aussagekräftig wäre, da die Tankstelle bereits vor mehr als 10 Jahren geplant und errichtet wurde. Im Fall der Multi-Energietankstelle der EnBW würde ein Vergleich ebenfalls keinen besonderen Erkenntnisgewinn bringen, da diese Tankstelle in 2013 eingeweiht wurde, und die 2019 stillgelegt wurde und die 350 bar Betankungsmöglichkeit für Busse nachträglich ergänzt wurde, d.h. die Tankstelle war ursprünglich als Pkw Tankstelle geplant.

Daher wurde entschieden im Rahmen der technologisch-wirtschaftlichen Bewertung die bestehende Tankstelle sowie mögliche zukünftige Szenarien für Ausbaustufen hinsichtlich Betankungsdynamik, Tageskapazität sowie jeweils verbundenen Investitions- und Betriebskosten zu untersuchen.

Untersuchte Szenarien

Zunächst wurden 4 Szenarien für die Tankstellenkonfiguration definiert (vgl. Tabelle 5). Die ersten beiden Szenarien entsprechen der heutigen Tankstelle in Gaisburg, wobei Szenario 1 den aktuellen Betrieb mit durchschnittlich 7 von 8 vorhandenen Wasserstoffbussen (12 m) widerspiegelt und Szenario 2 die geplante Erweiterung der Flotte um 10 weitere Wasserstoffbusse (18 m) in 2025 beinhaltet, von denen täglich durchschnittlich 9 betankt werden. Somit ergeben sich 16 Busse, welche in Szenario 2 täglich betankt werden. Ein weiterer Ausbau der Tankstelle zum Betrieb der zusätzlichen 9 bzw. 10 Busse ist zunächst nicht geplant und wird daher auch nicht in Szenario 2 berücksichtigt.

Szenario 3 repräsentiert eine geplante Erweiterung der vorhandenen Tankstelle, um in einem nächsten Schritt mindestens 30 Busse zu versorgen. Dabei wird angenommen, dass der vorhandene Hochdruckspeicher vergrößert wird und eine weitere H_2-Zapfsäule installiert wird. Die aktuelle Tankstelle verfügt mittlerweile aus Redundanzgründen über zwei Zapfsäulen. Die in Szenario 3 angenommene Konfiguration besteht also aus 3 Zapfsäulen, wobei angenommen wird, dass 2 davon täglich verwendet und die dritte lediglich der Redundanz bzw. Absicherung dient. In der unten folgenden Untersuchung der Betriebsdynamik wird gezeigt, dass in Szenario 3 täglich 30 und mehr Busse bedient werden können, je nach Verteilung der Betankungen über den Tag.

Szenario 4 stellt weiteren Ausbauschritt dar, in welchem eine hypothetische Großtankstelle für täglich 50 Busbetankungen betrachten wird, angelehnt and das entwickelte Lastenheft für eine neue Betriebshoftankstelle zur Versorgung von 50 Bussen mit H_2 und die primär über aktuell in Planung befindlichen H_2 Pipeline der Stadtwerke Stuttgart und Esslingen (H2 GeNeSiS Projekt[1], ko-gefördert vom Land Baden-Württemberg). Diese Großtankstelle verfügt neben der höheren Kapazität auch über eine deutlich erhöhte Redundanzauslegung. Es wird angenommen, dass der nutzbare Hochdruckspeicher der Tankstelle den gesamten Tagesbedarf der 50 Busse (ca. 1.100 kg H_2) vorhalten kann. Die Tankstelle könnte also auch bei ausgefallenen Kompressoren noch H_2-Busse über einen gesamten Betriebstag versorgen. Die Kompressionsleistung ist so gewählt, dass die erforderliche Tagesmenge innerhalb von 20 Stunden verdichtet werden kann. Weiterhin wird, wie bereits erwähnt, angenommen, dass die Tankstelle an eine H_2-Versorgungspipeline angeschlossen ist. Aufgrund des niedrigeren Drucks in der Pipeline verglichen mit der jetzigen Belieferung

[1] - vgl. https://www.plattform-h2bw.de/projekte-im-land/efre-modellregionen-gruener-wasserstoff/-modellregion-h2-genesis

mittels Druckgastrailer wird ein zusätzlicher Vorverdichter benötigt. Dieses Szenario soll dazu dienen erste Überlegungen zum zukünftigen Ausbau der SSB-Tankstelle aus betrieblicher und wirtschaftlicher Sicht anzustellen, es stellt noch keine konkrete Empfehlung zum weiteren Ausbau dar, kann aber als ein erster Referenzpunkt dienen und stellt eine Ergänzung der bereits dargestellten Szenarien dar.

Im Anschluss an die betrieblichen Untersuchungen werden Ergebnisse der wirtschaftlichen Untersuchung der vier Szenarien gezeigt. Dabei wird auf Investitionskosten aber auch Gesamtbetriebskosten der Tankstelle eingegangen.

Tabelle 5: Übersicht über die in der technologisch-wirtschaftlichen Bewertung analysierten Szenarien

	Szenario 1 Existierende SSB-Tankstelle, aktueller Betrieb	**Szenario 2** Existierende SSB-Tankstelle, geplanter Betrieb	**Szenario 3** Ausbau der SSB-Tankstelle	**Szenario 4** Neue Großtankstelle
Beschreibung	SSB Tankstelle Gaisburg, wie sie aktuell betrieben wird	SSB Tankstelle Gaisburg inklusive des geplanten Betriebs 9-10 neuer H_2-Busse	Hypothetischer Ausbau der aktuellen Tankstelle: Vergrößerung des Hochdruckspeicher sowie eine weitere Zapfsäule	Hypothetische Großtankstelle: Auslegung mit hoher Leistung und Redundanz sowie Anbindung an H_2-Versorgungspipeline
Betankungen pro Tag	7	16	30	50
H_2-Menge je Tankvorgang	22 kg			
Kapazität kg H_2 pro Tag	~500	~500	800-900	1.400-1.500
Anzahl Zapfsäulen (Redundanz)	1 (+1)	1 (+1)	2 (+1)	4 (+1)
Kapazität Hochdruckspeicher	171 kg	171 kg	758 kg	2.585 kg
Abgabe kg H_2 pro Tag	154 (~30% der Tageskapazität)	352 (~70% der Tageskapazität)	660 (~75% der Tageskapazität)	1100 (~75% der Tageskapazität)

Betriebsdynamik und Tankstellenkapazität in den Szenarien

Szenario 1 - Bestehende Tankstelle, tägliche Versorgung von 7 Bussen

Abbildung 17 zeigt die beispielhafte tägliche Betriebsdynamik der aktuellen Tankstelle.

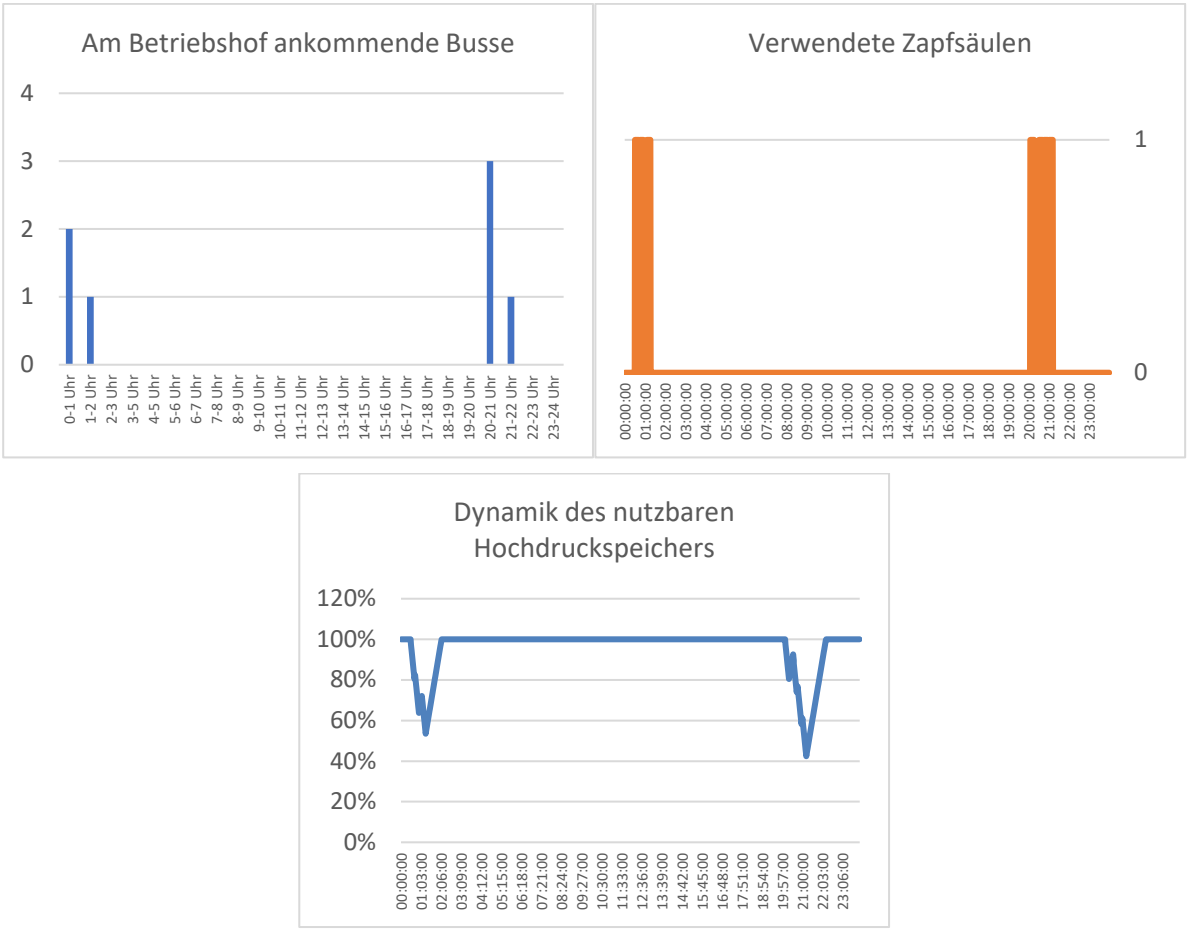


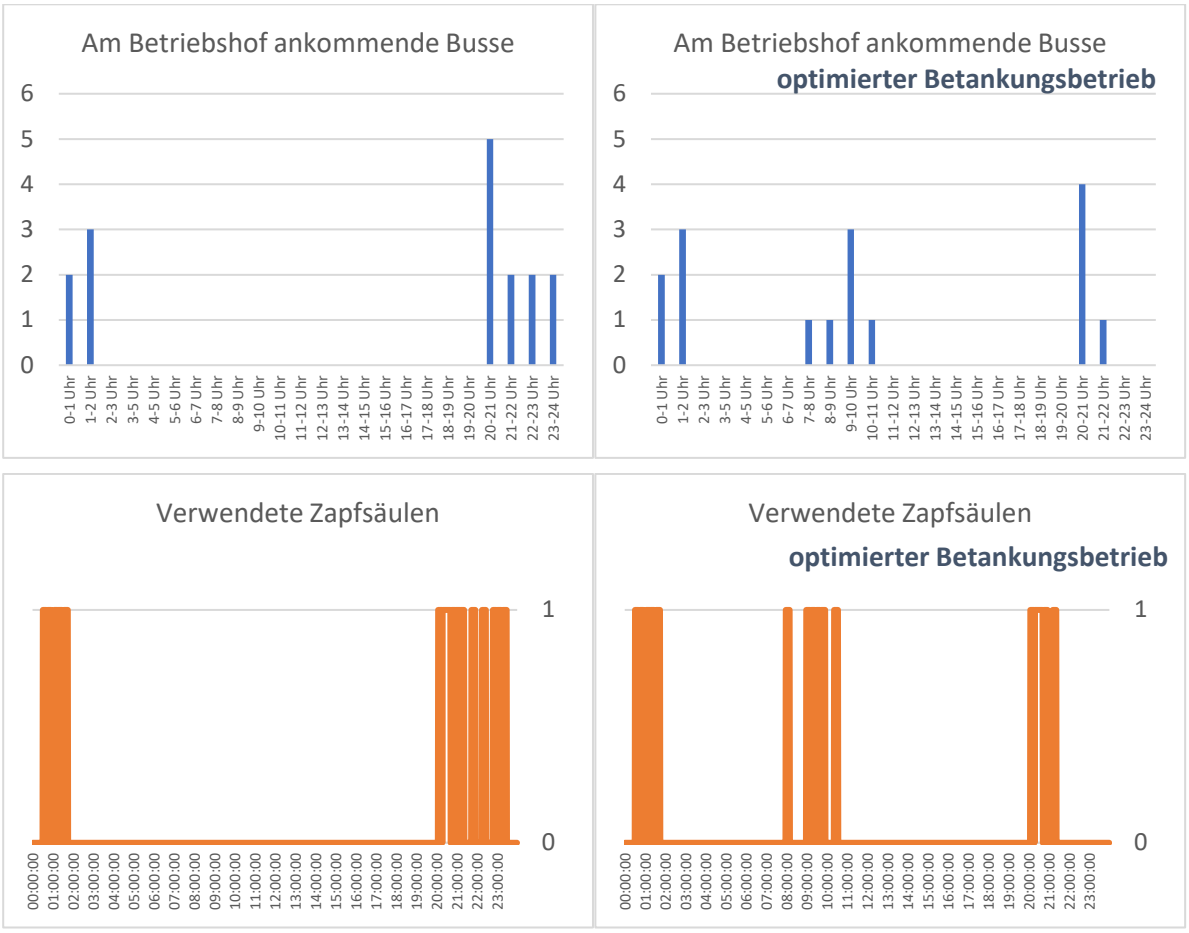
Abbildung 17: Beispielhafte Betriebshof- und Tankstellendynamik in Szenario 1
(Aktuelle Tankstelle und Anzahl Betankungen)

Unter der Annahme dass die 7 Busse in einem Zeitraum zwischen 20 Uhr und 2 Uhr morgens auf den Betriebshof kommen, werden sie jeweils direkt mit Wasserstoff betankt (Abbildung 17, links). Dadurch ergeben sich zwei Betankungsfenster, die jeweils vollständig mit einer Zapfsäule bedient werden können. Eine zweite Zapfsäule steht bereit, dient hier jedoch lediglich der Redundanz, falls es zu technischen Problemen mit der ersten Zapfsäule kommt (Abbildung 17, rechts). Der Füllstand des nutzbaren Teils des Hochdruckspeichers (ca. 43%

der Kapazität des Hochdruckspeichers) fällt auf ca. 40%, nachdem die ersten 4 Busse im Zeitraum 20-22 Uhr betankt wurden. Die Kompressionsleistung reicht aus, um den Speicher vor dem Start des zweiten Betankungsfensters ab 0 Uhr wieder vollständig zu füllen.

Szenario 2 - Bestehende Tankstelle, tägliche Versorgung von 16 Bussen

Abbildung 18 zeigt die betriebliche Dynamik in Szenario 2.



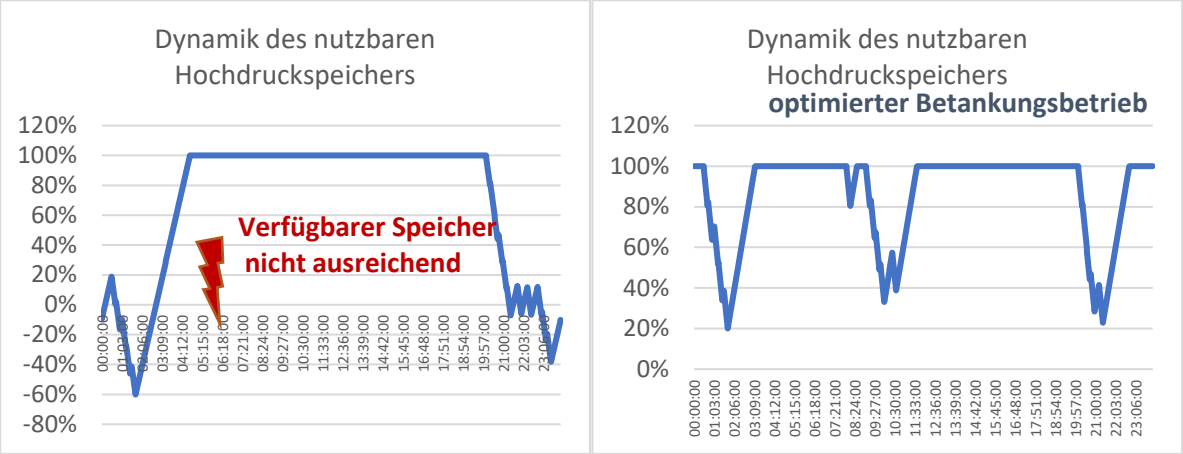


Abbildung 18: Betriebshof- und Tankstellendynamik in Szenario 2
(Aktuelle Tankstelle mit geplantem Betrieb 9 bzw. 10 weitere H_2-Busse;
linke Seite: Betrieb mit einem Betankungsfenster von 20-2 Uhr ist nicht möglich;
rechte Seite: Optimierter Betrieb mit drei Betankungsfenstern)

Auf den drei linken Graphen ist zunächst dargestellt, wie sich im Fall von einem bzw. zwei Betankungsfenstern im Zeitraum 20 Uhr bis 2 Uhr morgens (analog Szenario 1), die Betriebsdynamik ergeben würde. Es zeigt sich, dass der verfügbare Hochdruckspeicher nicht ausreicht, um innerhalb dieser Zeit alle 16 Fahrzeuge zu versorgen. Daher wurde ein optimierter Betrieb mit drei Betankungsfenstern vorgeschlagen, wie auf den Graphen der rechten Seite von Abbildung 18 dargestellt. Das dritte Betankungsfenster findet nun im Zeitraum 7 bis 11 Uhr statt. Somit können alle 16 Fahrzeuge versorgt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Füllstand des nutzbaren Anteils des Hochdruckspeicher auf etwa 20% abfällt. Über die 16 Betankungen hinaus sind mehrere weitere Betankungen mit der gleichen Tankstelle also nur dann möglich, wenn sie über den Tag verteilt, und nicht innerhalb der drei vorhandenen Zeitfenster, stattfinden.

Szenario 3 Erweiterung Hochdruckspeicher, tägliche Versorgung von 30 Bussen

Abbildung 19 zeigt die Betankungsdynamik für Szenario 3. Hierbei werden täglich 30 Fahrzeuge versorgt, wobei ein im Vergleich zu Szenarien 1 und 2 deutlich größerer Hochdruckspeicher (ca. 758 kg statt 170 kg) sowie eine zweite Zapfsäule zur Verfügung stehen. Der größere Speicher basiert auf Informationen des Anlagenherstellers (Fa. Schwelm), nach denen Speichercontainer mit den gleichen Abmessungen (20 Fuß Container) wie bei der bestehenden Tankstelle heute mit deutlich größerer Speicherkapazität von ca. 588 kg (30 Flaschen à 630 Liter) angeboten werden können.

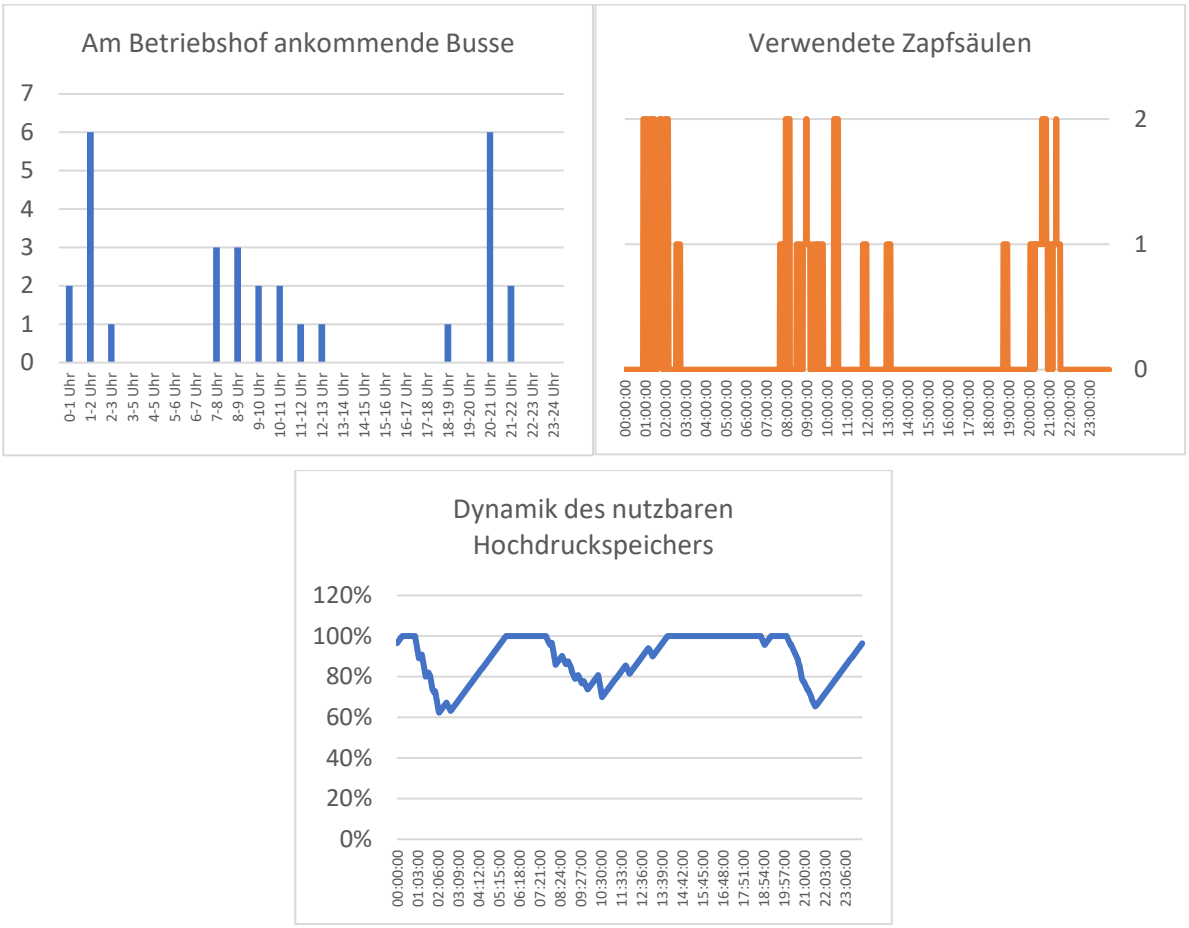


Abbildung 19: Betriebshof- und Tankstellendynamik in Szenario 3
(Aktuelle Tankstelle erweitert um deutlich größeren Hochdruckspeicher sowie eine weitere Zapfsäule)

Auch im Fall von Szenario 3 wurden drei über den Tag verteile Betankungsfenster gewählt, wobei erwähnt werden sollte, dass es aufgrund des größeren Speichers und der zusätzlichen Zapfsäule auch möglich wäre, alle 30 Busse innerhalb von zwei Zeiträumen zu versorgen. In diesem Fall würde der Hochdruckspeicher aber auf deutlich geringere Füllstände fallen, als es mit etwa 60% bei drei Betankungsfenstern der Fall ist. Die tägliche Kapazitätsgrenze dieser Tankstelle mit größerem Speicher läge bei Beibehaltung des Betriebskonzeptes mit 3 Tankfenstern bei etwa 40 Bussen bzw. maximal 900 kg. Bei mehr Bussen könnte der bestehende Kompressor den Hochdruckspeicher nicht mehr zu 100% füllen wodurch über mehrere Tage hinweg der Speicher geleert würde, bis es schließlich zu dem Fall käme, dass kein nutzbarer Wasserstoff mehr aus dem Speicher entnommen werden könnte.

Szenario 4 - Neue Großtankstelle, tägliche Versorgung von 50 Bussen

Abbildung 20 zeigt die Betankungsdynamik von Szenario 4. Dabei wird eine größere Tankstelle simuliert, die 50 Busse pro Tag versorgt und dabei nicht an ihre Kapazitätsgrenzen stößt.

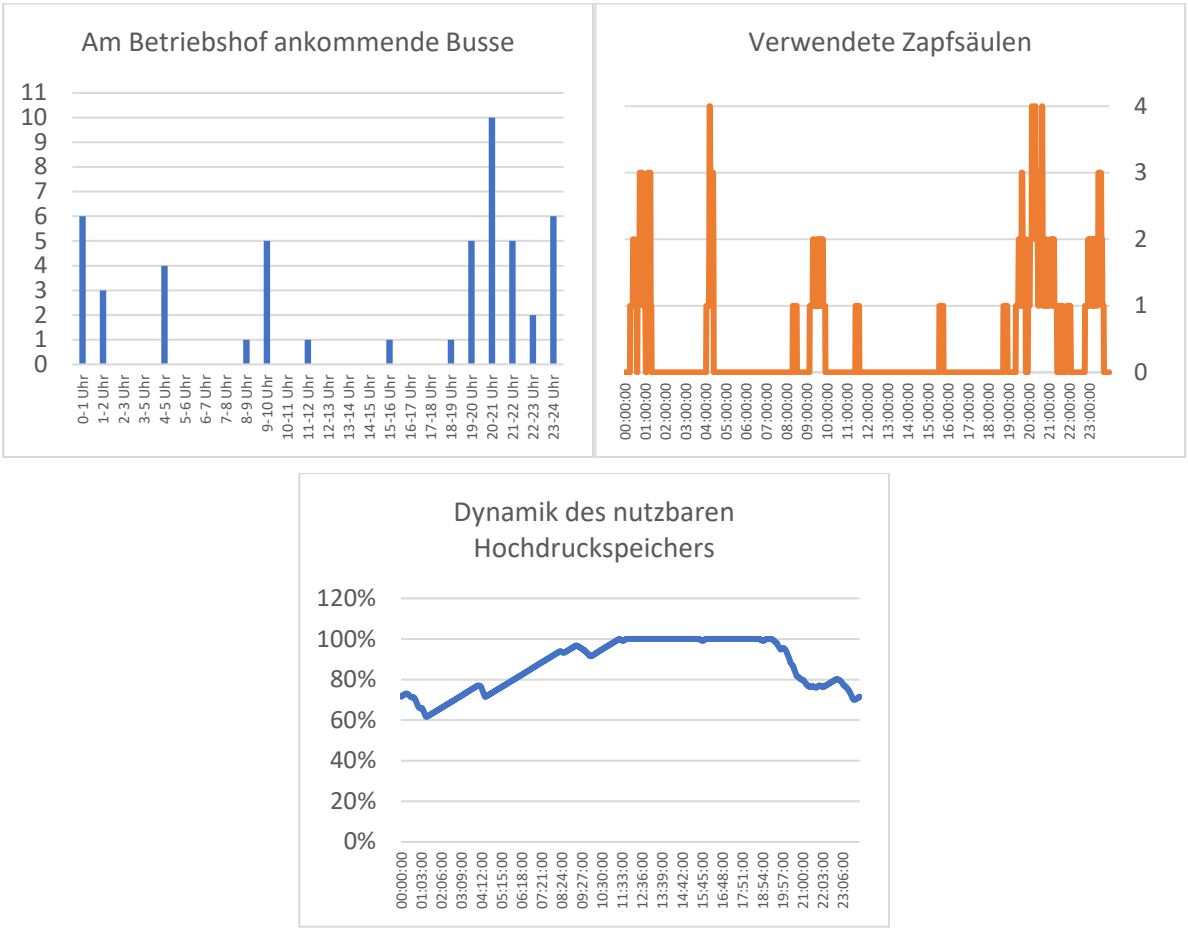


Abbildung 20: Betriebshof- und Tankstellendynamik in Szenario 4
(Hypothetische Großtankstelle mit erhöhter Leistungs- und Redundanzauslegung)

Zunächst sollte erwähnt werden, dass der modellierten Tankstelle eine hinsichtlich Redundanz und Versorgungssicherheit deutlich gesteigerte Auslegung zugrunde liegt. Sie stellt damit ein stückweit einen „Extremfall“ dar. So kann der Hochdruckspeicher von ca. 2,5 t H_2 eine Tagesmenge von 1,100 kg H_2 betanken, ohne dass zusätzliches Komprimieren erfindlich wäre. Im Falle des technischen Ausfalls der Kompressoren könnte also trotzdem ein weiterer Betriebstag normal ablaufen. Der große Speicher führt zu einem deutlich erhöhten Flächenbedarf. So wären statt des bisherigen einen 20-Fuß-Containers (bzw. in

Szenario 3 gezeigten erweiterten Tankstelle zwei Container) fünf solcher Container mit H_2-Speicher nötig. Die Container können nicht gestapelt werden. Inwiefern die dafür benötigte Fläche bereitgestellt werden kann, wurde im Rahmen dieser Untersuchung nicht weiter untersucht, und Bedarf einer Klärung. Bei der Auslegung ist weiterhin darauf zu achten, dass die im räumlichen Zusammenhang gelagerte Wasserstoffmenge möglichst unter 5 t H_2 bleibt, um hinsichtlich des erforderlichen Genehmigungsverfahrens nicht als Störfallverordnungspflichtige Anlage eingestuft zu werden, da sich hieraus ein deutlich aufwendigeres Genehmigungsverfahren ergibt, bei gleichzeitig erhöhtem Risiko dass eine solche Tankstellenkonfiguration evtl. nicht genehmigungsfähig ist am Standort Gaisburg.

Etwa zwei Drittel der 50 Busse in Szenario 4 kommen im Zeitraum 19 Uhr bis 2 Uhr morgens zur Betankung auf den Betriebshof. Bei der modellierten Verteilung der Betankungen wurde darauf geachtet, dass sie qualitativ in etwa dem tatsächlichen Verlauf der heutigen Dieselbetankungen entsprechen. Bei einer solchen Verteilung der Betankungen über den Tag werden in zwei Zeiträumen bis zu 4 Zapfsäulen gleichzeitig verwendet. Wenn Wartezeiten von einigen Minuten akzeptiert werden, könnten die Busse auch mit drei Zapfsäulen versorgt werden.

Trotz der hohen Anzahl an Betankungen pro Tag sinkt der Füllstand des Hochdruckspeichers nie unter 60% der nutzbaren Kapazität. Je nach Tagesdynamik könnte die modellierte Tankstelle täglich in etwa 65 Busse versorgen, was einer Wasserstoffmenge von über 1.400 kg pro Tag entspräche.

Wirtschaftliche Bewertung der Szenarien

Im Folgenden Abschnitt werden die vier untersuchten Szenarien hinsichtlich ihrer jeweiligen Investitions- und Betriebskosten untersucht.

In Abbildung 21 werden die reinen Investitionskosten (ohne Kapital bzw. Zinskosten, ohne Förderung) vergleichend für die vier Szenarien dargestellt. Dabei wird nicht unterschieden, zu welchem Zeitpunkt die Investitionen getätigt wurden bzw. werden. Die in Szenario 1 und 2 untersuchte Tankstelle existiert bereits. Die in Szenario 3 analysierte Erweiterung des Speichers wird auf die schon angefallenen Kosten der bestehenden Tankstelle aufsummiert. In diesem Fall würden also zusätzliche Investitionen von etwa 700 k€ anfallen, wovon 560 k€ für den Hochdruckspeicher nötig wären, ca. 70 k€ für zusätzliche Planung, Genehmigung und Installationskosten und weitere ca. 70 k€ für die zusätzliche Zapfsäule.

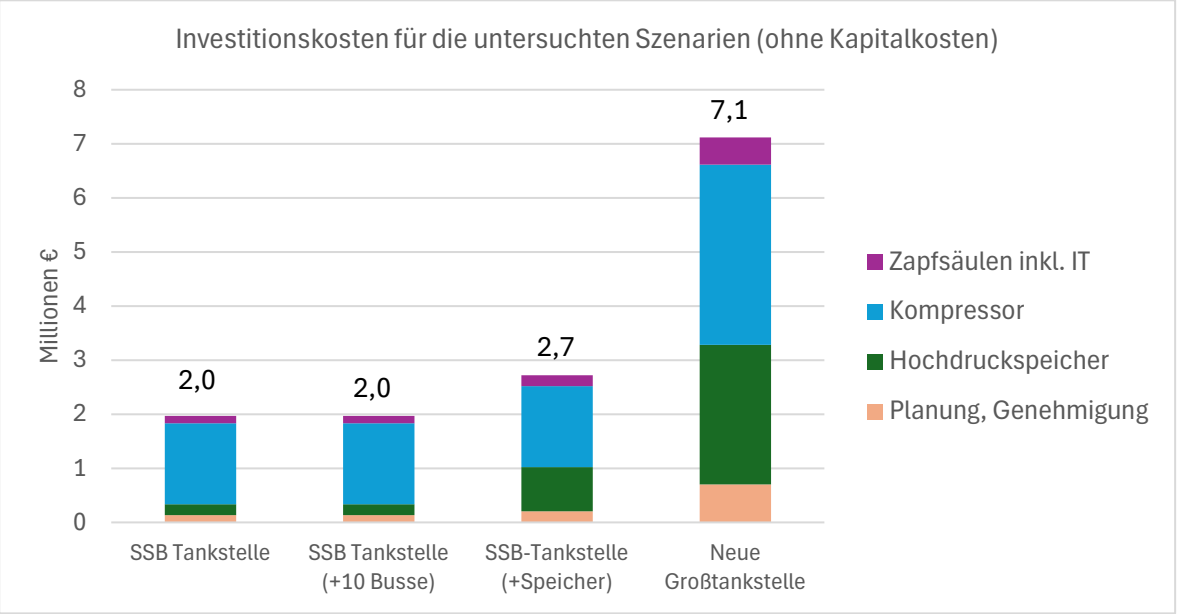


Abbildung 21: Vergleich der Investitionskosten der untersuchten Szenarien

Für die hypothetische Großtankstelle in Szenario 4 wären Gesamtinvestitionskosten von etwa 7,1 Mio. € nötig. Diese Abschätzung basiert nicht auf konkret vorliegenden Angeboten, sondern einer Extrapolation der bekannten Kosten für die bisherige Tankstelle und Erweiterung, ist also mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Es wurde angenommen, dass weiterhin ca. 10% der Investitionskosten, also 700 k€, für die im Planung und Genehmigung benötigt werden, aufgrund der im Vergleich zur bestehenden Tankstelle deutlich erhöhten Flächenbedarfe und der höheren technischen Komplexität der Anlage mit Anbindung an eine Versorgungspipeline.

Die größten Investitionskostenanteile ergeben sich für die Kompressoren mit einer Kapazität von ca. 165 kg/h (3,3 Mio. €). Dabei wurde angenommen, dass neben der Kompression in den Hochdruckspeicher eine Vorverdichtung nötig sein wird, um die Tankstelle aus der angeschlossenen Pipeline zu versorgen. Diese ist redundant ausgeführt. Der im Vergleich zu den anderen Szenarien deutlich größere Hochdruckspeicher ist mit Investitionskosten von ca. 2,6 Mio. € verbunden. Die Investitionskosten für die vier regelmäßig genutzten sowie einer redundanten Zapfsäule lassen sich mit etwa 0,5 Mio. € abgeschätzten.

Neben den Investitionskosten wurden auch Kapital- und Betriebskosten der verschiedenen Szenarien abgeschätzt (vgl. Tabelle 6). Dabei wurden folgende Eingangsparameter verwendet. Die Kosten für angelieferten Wasserstoff sind in den Betriebskosten **nicht** enthalten.

Tabelle 6: Annahmen Kostenrechnung

Kapitalkosten	Abschreibungszeitraum	12 Jahre
	Kapitalverzinsung	4%
Betriebskosten	Wartungskosten	5% der Investitionskosten pro Jahr
	Strombedarf	1,5 kWh pro kg H2
	Stromkosten	30 ct pro kWh

Als Summe aus Investitions-, Kapital- und Betriebskosten ergeben sich die Gesamtkosten je untersuchtem Szenario, welche in Abbildung 22 dargestellt sind.

Beim Vergleich der Gesamtkosten sollte die unterschiedliche Anzahl versorgter Busse bzw. die damit abgegebene Wasserstoffmenge pro Tag beachtet werden, die in Abbildung 22 nochmals aufgeführt ist. In Szenario 2 ergeben sich gleiche Investitionskosten wie in Szenario 1, da es sich um die gleiche Tankstelle handelt. Die Betriebskosten in Szenario 2 sind gegenüber Szenario 1 erhöht, da eine größere Menge Wasserstoff getankt wird, was mit höheren Stromkosten verbunden ist.

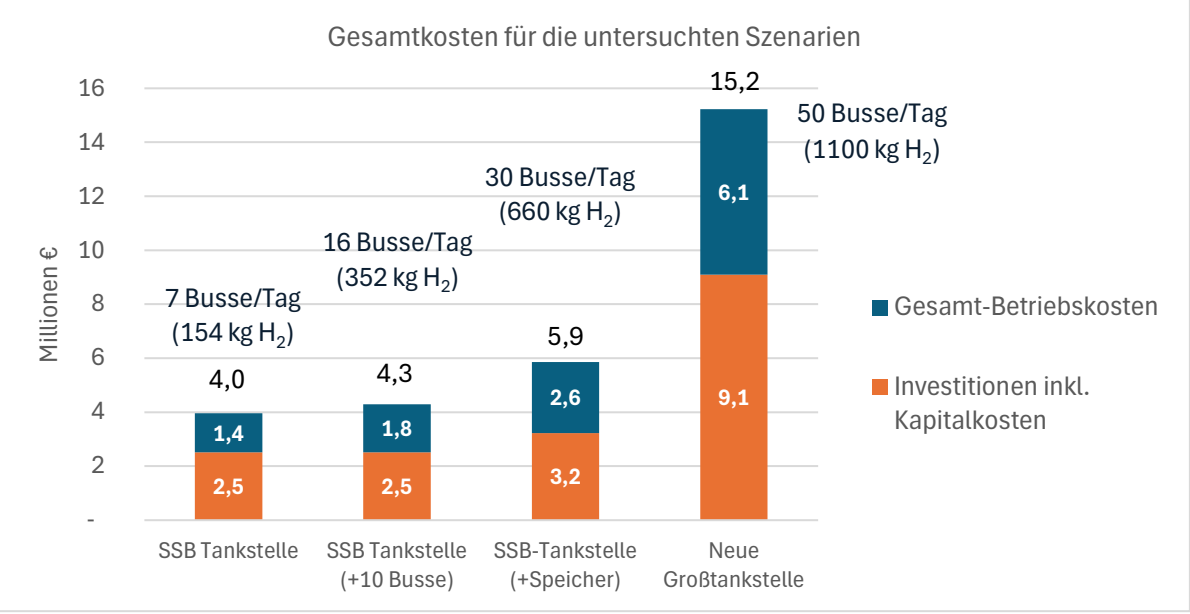


Abbildung 22: Vergleich der Gesamtkosten der untersuchten Szenarien

Die spezifischen Gesamtkosten je kg H_2 sind in Abbildung 23 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Kosten je kg H_2 im Szenario 2 aufgrund des höheren Wasserstoffdurchsatzes bei gleicher Tankstelle mit 3,2 €/kg H_2 deutlich niedriger sind als in Szenario 1 mit 6,8 €/kg H_2.

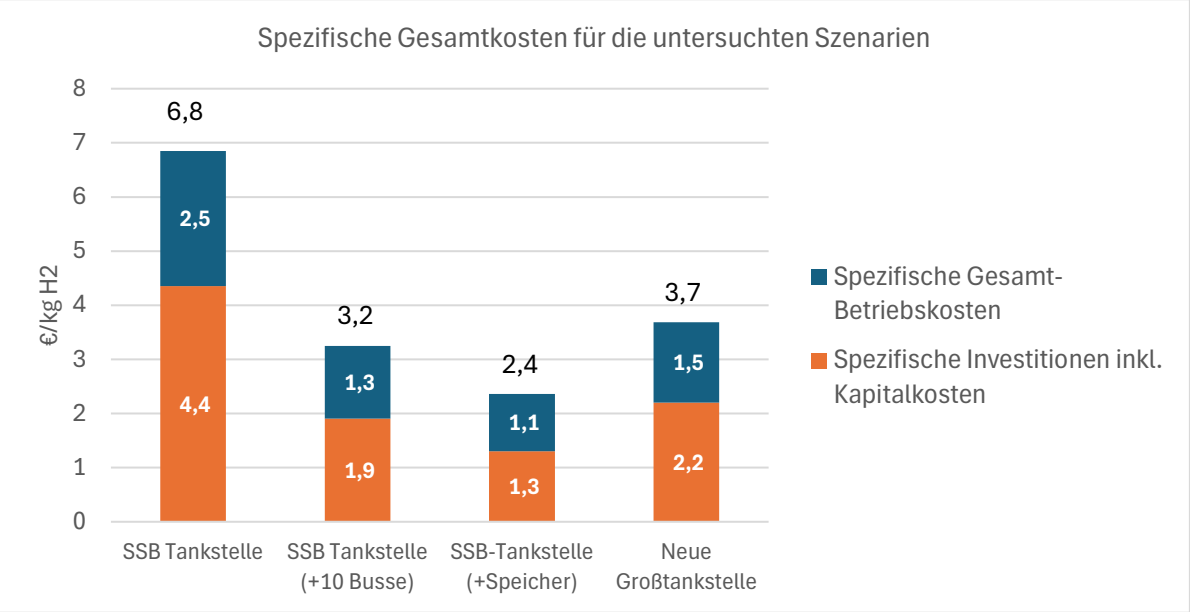


Abbildung 23: Vergleich der spezifischen Gesamtkosten der untersuchten Szenarien

Szenario 3 führt zu den geringsten spezifischen Kosten, da die Investitions- und Betriebskosten gegenüber Szenario 2 nur zwar aufgrund der Erweiterung erhöht sind, gleichzeitig aber auch die täglich abgegebene Wasserstoffmenge mit 660 kg gegenüber 352 kg deutlich größer ist.

Szenario 4 ist aufgrund der Auslegung mit großer Redundanz von hohen Gesamtkosten geprägt (vgl. Abbildung 22). In der spezifischen Betrachtung ergeben sich jedoch Kosten, die mit 3,7 €/kg geringer als bei der jetzigen Tankstelle mit geringer Auslastung sind.

Insgesamt zeigt sich das aus betrieblicher Sicht der logische nächste Schritt die Erweiterung des Hochdruckspeichers ist (Szenario 3) und für den weiteren Ausbau der H_2-Busflotte bei der SSB (Szenario 4) grundlegende Entscheidungen zu treffen sind hinsichtlich der Auslegungsphilosophie bzw. was unter Berücksichtigung der Gegebenheiten am Standort (Stichworte Platzbedarf Hochdruckspeicher, Genehmigungsverfahren in Abhängigkeit H_2-Lagermenge) machbar ist.

1.3.4 Entwicklung eines Lastenhefts

Entsprechend der Strategie der SSB - die Busflotte bis spätestens 2037 vollständig auf lokal emissionsfreie Antriebe umgestellt zu haben - ergibt sich für das Unternehmen die Anforderung perspektivisch eine leistungsfähige Wasserstoffversorgungsinfrastruktur aufzubauen. Abgeleitet aus der seit 2006 kontinuierlich weiterentwickelten Antriebsstrategie der SSB, die zuletzt 2021 aktualisiert wurde, plant die SSB, alle Innenstadtlinien in Stuttgart bis 2027 auf emissionsfreie Antriebe (H_2/BZ und BEV) umzustellen. Ein Baustein zur Erreichung dieses Zieles ist die Bereitstellung einer Wasserstofftankstelle für 50 Brennstoffzellenbusse am Betriebshof in Stuttgart-Gaisburg. Dies entspricht einer Abgabekapazität von etwa 1.000 bis 1.200 kg H_2 pro Tag bei einem Speicherdruck in den Bussen von 350 bar.

Basis der Berechnung des benötigten Wasserstoffbedarfes ist eine durchschnittliche tägliche Laufleistung von 200 Kilometern und ein Verbrauch von 9 kg/100 km für Solobusse bzw. 12 kg/100 km für Gelenkbusse. Es wird von einer Verfügbarkeit der Busse von 93 % ausgegangen (340 Betriebstage).

Als Unternehmen der öffentlichen Hand ist die SSB verpflichtet, die Beschaffung größerer Investitionsgüter europaweit auszuschreiben. Als Vorbereitung einer solchen Ausschreibung entwickelte Sphera in Zusammenarbeit mit SSB ein Lastenheft, das die technischen und betrieblichen Spezifikationen für die Planung, Errichtung, Wartung und Instandhaltung der benötigten Wasserstofftankstelle beinhaltet (vgl. Abbildung 24). Die Versorgung der Tankstelle mit Wasserstoff erfolgt primär über die derzeit in Planung befindliche H_2-Pipeline, die von den Stadtwerken Stuttgart und Esslingen im Rahmen des mit Landesmitteln kofinanzierten H2GeNeSis Projektes[1] errichtet wird.

[1] - vgl. https://www.plattform-h2bw.de/projekte-im-land/efre-modellregionen-gruener-wasserstoff/-modellregion-h2-genesis

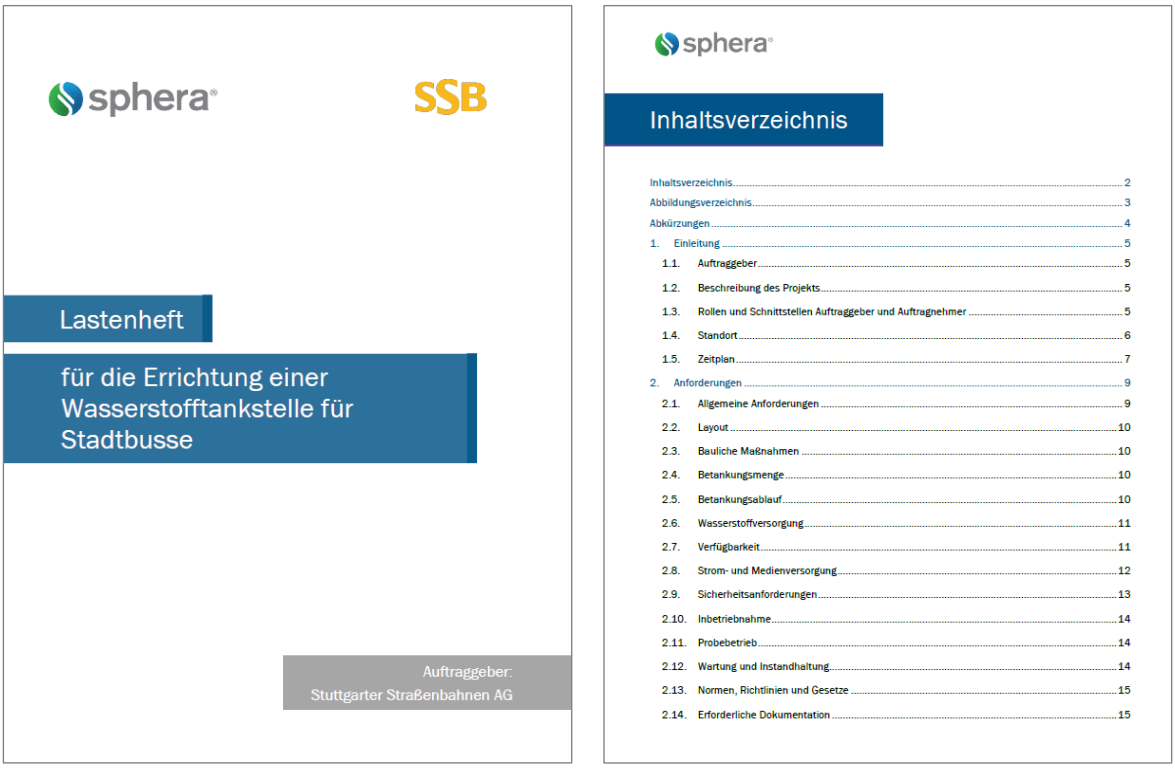


Abbildung 24: Lastenheft für eine Wasserstofftankstelle zur Versorgung von 50 wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenbussen

1.3.5 Optimierung der Tankstelle

In der ersten Jahreshälfte 2021 rüstete die SSB die Wasserstofftankstellenanlage mit Langsambetankung in der Zapfsäule für neue Typ 4 Speicherflaschen nach, um die Brennstoffzellenbusse auch mit einem leeren Tank zuverlässig betanken zu können. Diese Sonderbetankung bei 3 bar pro Minute findet bis 15 bar statt. Darüber hinaus wurde die Zapfsäule überdacht (vgl. Abbildung 25).

In der zweiten Jahreshälfte 2021 gab es eine weitere Optimierungsmaßnahme, bei der ein neuer Ventiltyp für die Sonderbetankung mit Typ 4 Gasdruckflaschen verbaut wurde.

Abbildung 25: Nachrüstung der Wasserstoffbetriebshoftankstelle in Stuttgart-Gaisburg

Angesichts des geplanten Ausbaus der Anzahl der eigenen Brennstoffzellenbusse strebt die SSB neben der Versorgungssicherheit auch eine gute Integration in den Betriebsablauf an. Aus diesem Grunde bereitete die SSB eine Erweiterung der Tankstelle vor, die im Rahmen eines weiteren Projektes stattfindet. Im Förderprojekt H2Rivers[1] wird die Betriebshoftankstelle um weitere technische Komponenten, nämlich ein Verdichter und einen Dispenser, erweitert. Das Ziel ist dabei eine sehr hohe bzw. vollständige Redundanz, um die für einen stabilen Betrieb erforderliche Verfügbarkeit der Tankstelle von über 95 % zu erreichen. Gerade im Hinblick auf Flottenanwendungen stellen die Projekterkenntnisse ein Schlüsselelement für eine funktionierende Wasserstoffwirtschaft dar und unterstützen die Klima- und Energieziele der Bundesregierung [2].

[1] - Förderkennzeichen: 03B20319; Projektlaufzeit: 01.12.2021 bis 31.12.2023, vgl. https://www.h2rivers.de/h2rivers/projektpartner/detailseite/ssb

1.4 Projektmanagement & Wissenstransfer

1.4.1 Projektmanagement

Für die Planung und Steuerung aller Projektaktivitäten wurde das technische und kaufmännische Projektmanagement eingesetzt. Im Rahmen des technischen Projektmanagements wurden alle Arbeiten innerhalb des Projektes koordiniert und die Einhaltung des Zeitplans und der Ziele überwacht. Das kaufmännische Projektmanagement diente zur finanziellen Abrechnung mit dem Projektförderer und Überwachung der Projektkosten. Falls es zu Abweichungen kam, wurde der Projektträger informiert und Maßnahmen wurden ergriffen, um die Ziele termin- und budgetgerecht zu erreichen. Halbjährliche Statusberichte dokumentierten den Projektverlauf mit den erzielten Ergebnissen. Am Ende des Projektes wurde der vorliegende Abschlussbericht erstellt.

1.4.2 Wissenstransfer

Treibhausgasneutrale Brennstoffzellenantriebe hält die SSB für einen effizienten Lösungsansatz für den ÖPNV in Stuttgart [1]. Deshalb engagiert sich das Unternehmen seit zwanzig Jahren mit wasserstoffbetriebenen Omnibussen. Der Fokus lag bisher auf den Fahrzeugen und den genutzten Brennstoffzellen. Die Wasserstoffinfrastruktur ist ebenso ein wichtiges Element, das zunehmend in den Interessenfokus der Busbetreiber rückt und einen verstärkten Wissenstransfer erfordert.

In diesem Projekt wurden wichtige Kenntnisse zum zuverlässigen und wirtschaftlichen Wasserstoffversorgungskonzept generiert. Die Erkenntnisse aus dem Betrieb der hauseigenen Wasserstofftankstelle dienen der Bewertung des genutzten Konzeptes für die Versorgung der Brennstoffzellenbusse mit Wasserstoff und können deutschlandweit sowie international verwendet werden. Ob die Anwendung von Wassersstoff- und Brennstoffzellentechnologie erfolgreich verläuft, hängt nicht zuletzt von dem Wissenstransfer und Ergebnisaustausch ab.

Im Februar 2021 besuchte Stefan Kaufmann, Stuttgarter Bundestagsabgeordneter und Innovationsbeauftragter „Grüner Wasserstoff“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, den SSB Betriebshof in Stuttgart-Gaisburg und schaute sich die Tankstelle im laufenden Betrieb an (vgl. Abbildung 26). Stefan Kaufmann begrüßte die Betriebsaufnahme der Wasserstofftankstelle: „Der Verkehrssektor muss auf technologischen Fortschritt setzen, um die Klimaziele zu erreichen. Brennstoffzellenbusse können die CO_2-Emissionen im

öffentlichen Personennahverkehr erheblich senken. Ich freue mich sehr, dass die SSB beim Aufbau der hierfür erforderlichen Tankinfrastruktur voranschreitet“.

Abbildung 26: Innovationsbeauftragter der Bundesregierung für den Bereich "Grüner Wasserstoff" zu Besuch in Stuttgart-Gaisburg

Eine indische Delegation besuchte 2022 den SSB Betriebshof in Stuttgart-Gaisburg und informierte sich über die Entwicklung und den Stand der Wasserstofftechnik informiert (vgl. Abbildung 27). Der Projektleiter Markus Wiedemann erklärte dem indischen Botschafter Harish Parvathaneni und dem indischen Generalkonsul aus München, Mohit Yadav, die Funktionsweise der Wasserstofftankstelle und den Tankvorgang. Anschließend wurden die Gäste mit einem Brennstoffzellenbus in Stuttgart gefahren und konnten so praktische Erfahrung im realen Einsatz der Brennstoffzellentechnologie sammeln.

Abbildung 27: Indische Delegation zu Besuch in Stuttgart-Gaisburg

Ende 2022 fand der 3. HyLand-Fachworkshop zum Thema Wasserstoffmobilität in Stuttgart statt. Diese Hybridveranstaltung mit insgesamt 54 Teilnehmenden bestand aus Fachvorträgen sowie Projektvorstellungen. Im Rahmen des Workshops berichtete Projektleiter Markus Wiedemann über die Erfahrungen der SSB AG mit Brennstoffzellenbussen sowie dem Betrieb der Wasserstoffbetriebshoftankstelle. Die zwei weiteren aus dem Projekt entstandenen Fachvorträge gaben einen Einblick in die wasserstofffähige Werkstatt durch Steffen Raff (SSB) und in die Konfiguration und Technik der Wasserstofftankstellenanlage durch Sebastian Bäumges (Schwelm Anlagentechnik). Nach den Fachvorträgen und Projektvorstellungen besichtigten die Teilnehmenden die Wasserstofftankstelle und die wasserstofffähige Werkstatt der SSB in Stuttgart-Gaisburg (vgl. Abbildung 28). Die Fahrt zum Betriebshof wurde mit einem Brennstoffzellenbus der SSB AG durchgeführt.

Abbildung 28: Teilnehmer des 3. HyLand-Fachworkshops zu Besuch in Stuttgart-Gaisburg

Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen fließen in die Arbeit der NIP, CEP und der H_2-Mobility-Initiative ein und tragen dazu bei, bis 2030 ein Netz von circa 1.000 Wasserstofftankstellen in Deutschland aufzubauen.

Die Ergebnisse werden von der SSB für die Entwicklung der Nachhaltigkeitsstrategie verwendet und stehen auch den Herstellern und anderen Busbetreibern zur Verfügung. Dies ebnet den Weg für die angestrebte großangelegte Umstellung des innerstädtischen Busbetriebs und führt zur Steigerung der Akzeptanz gegenüber der Brennstoffzellentechnologie bei Busbetreibern, der Öffentlichkeit und den Kommunen.

2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Zuwendung wurde im Wesentlichen wie geplant verwendet. Alle Sachmittel wurden während der Projektlaufzeit entsprechend des Projektfortschritts beschafft.

Zu den wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises gehören:

- Personal- und Reisekosten,
- Ausgaben für die Errichtung der Wasserstoffbetriebshoftankstelle in Stuttgart- Gaisburg (AfA- und sonstige unmittelbare Kosten).

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Projekt leistet einen Beitrag, den Verkehrssektor ökonomisch, ökologisch und sozial verträglich zu gestalten.

Die Errichtung der hauseigenen Wasserstofftankstellenanlage und ihre Erprobung für die Betankung der eigenen wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenbusse ermöglicht eine praxisgerechte Optimierung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie und die Gewinnung zahlreicher Betriebsmanagementerkenntnisse.

Die Entwicklung eines kostengünstigen und zuverlässigen Betankungskonzepts unterstützt die Fortführung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) und leistet einen Beitrag zur Kostenreduktion und damit zur Fortschreibung des Innovationsprozesses für die Energiewende.

Die gewonnenen Erkenntnisse tragen zur Beschleunigung des flächendeckenden Markteintrittes von emissionsfreien Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologien im Verkehrssektor bei, führen zum Kompetenzaufbau und leisten überregional einen Beitrag zur Förderung von Arbeitsplätzen im Bereich innovativer Technologien.

Die Ergebnisse aus dem Betrieb der Tankstelle und dem Umgang mit der Brennstoffzellen-Technologie helfen dabei, die Tätigkeit der Clean Energy Partnership (CEP) voranzutreiben. Darüber hinaus unterstützt das Vorhaben die Ziele der „H_2-Mobility“-Initiative, bis 2030 ein Netz von ca. 1.000 Wasserstofftankstellen zu errichten, und leistet einen Beitrag zum Austausch von Erfahrungen aus dem Alltagsbetrieb zwischen Anwendern für die Koordination eines „nationalen Wasserstoffversorgungskonzepts“ sowie zu den Arbeiten zum Thema „Regulations, Codes & Standards“. Ein standardisiertes Konzept erleichtert den Aufbau einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur und ermöglicht wesentliche Verbesserungen im Bereich der Wartung, Zuverlässigkeit, Kosten und Genehmigungsverfahren.

Durch den Bau der Wasserstofftankstelle auf dem Betriebshof in Stuttgart-Gaisburg war das Projekt mit hohem Aufwand verbunden. Ohne die Förderung durch das BMDV hätte die SSB AG das Projekt nicht durchführen können. Fördermittel aus anderen Programmen oder dem EU-Forschungsrahmenprogramm standen der SSB AG nicht zur Verfügung.

Die Zuwendung wurde im Wesentlichen wie vorgesehen verwendet und ihre Höhe erwies sich als angemessen.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Das Projekt unterstützt den Wandel von fossiler Energie hin zur Wasserstoffwirtschaft und die Erreichung der Ziele der Bundesregierung, die CO_2-Emissionen zu senken und die Produkt- und Anwendungsmöglichkeiten der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie entscheidend nach vorne zu bringen, um eine breite Markteinführung zu ermöglichen.

Die Versorgung der Brennstoffzellenbusflotte der SSB mit Wasserstoff an der errichteten hauseigenen Wasserstofftankstellenanlage bringt Erkenntnisse hinsichtlich des technischen Konzepts der Betankungsinfrastruktur für wasserstoffbetriebene Stadtbusse. Diese tragen zum Aufbau einer sicheren Wasserstoffversorgung mit Nutzung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen bei, um die wirtschaftlichen und politischen Hürden zu überwinden.

Die Erkenntnisse fließen unter anderen in die zukünftige Nachhaltigkeitsstrategie der SSB, einen ressourceneffizienten, umweltfreundlichen und wirtschaftlich vertretbaren ÖPNV anzubieten, ein. Die Erkenntnisse sind auf weitere Städte und Regionen Deutschlands übertragbar. Durch das Projekt wird mehr Transparenz hinsichtlich des Betriebsmanagements geschaffen und ein Beitrag zur Förderung von Arbeitsplätzen geleistet.

Mit dem Projekt sendet die SSB ein klares Signal, dass das Unternehmen auch zukünftig auf die Brennstoffzellentechnologie setzt. Dies wirkt sich auf die produzierte Stückzahl und die damit verbundenen Kostensenkungen aus.

5 Während des Projektes bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Nicht bekannt

Literaturverzeichnis

[1] N.N. (2023) : Alle SSB-Busse im Stadtzentrum bis 2027 emissionsfrei; Meldung vom 21.10.2023, Landeshauptstadt Stuttgart. https://www.stuttgart.de/service/aktuelle-meldungen/oktober-2023/investitionsprogramm-fuer-die-stuttgarter-innenstadtbuslinien-beschlossen-bis-2027-sollen-im-talkessel-alle-busse-der-ssb-mit-emissionsfreien-antrieben-unterwegs-sein.php, zuletzt besucht am 07.05.2024

[2] N.N. (2016): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Herausgeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/klimaschutzplan-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt besucht am 10.05.2024