

Forschungsbericht BWPLUS

Standortspezifische Umsetzungsplanung einer H₂-Ladeinfrastruktur für Stadtbusse in Heidelberg (H₂SOUL)

Von

Stefan Kupferschmid², Stefan Eckert²
Sebastian Menges¹

¹ Rhein-Neckar-Verkehr GmbH
² thinkstep AG

Förderkennzeichen: BWÖPN 19001 und 19002

Als assoziierte Partner haben das Projekt unterstützt:

Stadt Heidelberg
EvoBus GmbH
Air Liquide Advanced Technologies GmbH

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit
Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Überarbeitung Januar 2020

Inhaltsverzeichnis

Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse.....	1
Motivation und Hintergründe des Vorhabens.....	2
Aufgabenstellung.....	2
Wissenschaftlicher und technischer Stand	3
Aktuelle Entwicklungen und grundsätzliche Herausforderungen.....	4
Planung und Ablauf des Vorhabens	4
Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers	6
Erzielte Ergebnisse	6
Nutzen und praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse	10
Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen.....	10
Ergebnis- und Forschungstransfer.....	11
Referenzen.....	11

Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Im Vorhaben wurde eine Grobplanung für die Umstellung der innerstädtischen Busflotte in der Stadt Heidelberg auf wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Busse erarbeitet. Als Technologie wurden Brennstoffzellenhybrid (BZ)-Busse und Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-REX) berücksichtigt. Da der derzeitige Betriebshof aus Platzgründen die Installation einer Lade- als auch Wasserstoffbetankungsinfrastruktur nicht zulässt und ein neuer Betriebshofstandort noch nicht absehbar ist, sollte die erste Phase der Flottenumstellung auf einem Interimsbetriebshof erfolgen. Daraus ergaben sich drei Planungsvarianten:

- Variante A: BZ-REX mit Abstellung auf dem Interimsbetriebshof
- Variante B: BZ mit Abstellung auf dem Interimsbetriebshof
- Variante C: BZ reine Betankung und Abstellung auf dem bisherigen Betriebshof Bergheim

Bei der Planungsvariante C, die nur für BZ-Fahrzeuge möglich ist, wird der aufwändige Abriss der bestehenden Gebäude und die Anlage einer Busabstellfläche auf dem Interimsbetriebshof vermieden. Allerdings erfordert die Variante einen höheren Aufwand bei der Fahrzeugversorgung, da die Busse zur Betankung zwischen dem bisherigen Betriebshof Bergheim und dem Interimsstandort hin- und hergefahren werden müssen.

Zunächst wurde anhand der Flottenstruktur und der aktuellen Umläufe der Energiebedarf der Fahrzeuge bestimmt. Dieser diente unter Berücksichtigung der Randbedingungen für die Fahrzeugversorgung als Grundlage für die Auslegung der Tank- und Ladeinfrastruktur, die durch AirLiquide bzw. EvoBus vorgenommen wurde. Für das Areal Wieblinger Weg 92 erfolgte dann eine detaillierte Standortanalyse für die Nutzung als Interimsbetriebshof. Nach Auskunft der Stadtwerke Heidelberg kann die jeweils notwendige Anschlussleistung auf dem Grundstück ohne zusätzliche Netzertüchtigungsmaßnahmen bereitgestellt werden. Die Analyse umfasste dann ein mögliches Layout für jede der Planungsvarianten, wozu der Platzbedarf für die Abstellung, Wasserstofftankstelle und Ladeinfrastruktur, Rangierfläche, Werkstatt und Sozialräume, sowie Abstandsregelungen und bauliche Restriktionen aufgrund der auf dem Grundstück verlaufenden Gashochdruck- und Mittelspannungsleitung berücksichtigt werden mussten. Ergänzend wurden weitere planerische Aspekte wie die erforderlichen Baumaßnahmen und die Genehmigungserfordernisse einschließlich naturschutzrechtlicher und Lärmschutzaspekte dargestellt.

Für die drei Planungsvarianten wurden die resultierenden Gesamtkosten mittels der Kapitalwertmethode verglichen. Angesichts der Unsicherheiten hinsichtlich der getroffenen Annahmen liegen die Ergebnisse für beide Technologievarianten in einem ähnlichen Bereich. Mit den Angaben von EvoBus, dass mit dem Einsatz einer Festkörperbatterie beim BZ-REX kein Komponententausch mehr erforderlich ist, erweist sich der BZ-REX um etwa 3 % günstiger als der BZ. Ist ein Komponententausch bei beiden Technologieoptionen gleichermaßen erforderlich bzw. entfällt, weist der BZ-REX gegenüber dem BZ um 2-3 % höhere Kosten auf. Bei einer Variation des H₂-Preises um ± 20 % oder einer Senkung des Ladestrompreises auf bis zu 6 ct/kWh erweisen sich die Ergebnisse als stabil.

Weiterhin wurde die Reduktion an NO_x- und Treibhausgasemissionen der Varianten im Vergleich zum Einsatz von Dieselnissen (Euro VI) verglichen. So werden durch den Betrieb der H₂-Busse bei einer kompletten Flottenumstellung rund eine Tonne NO_x-Emissionen pro Jahr vermieden. Sofern erneuerbarer Strom sowie grüner Wasserstoff verwendet werden, lassen sich mit beiden Fahrzeugtechnologien unter den getroffenen Annahmen pro Jahr etwa 3.000 Tonnen CO_{2e} im Vergleich zur konventionellen Diesel Euro VI-Technologie einsparen.

Abschließend wurden weitere für die Umsetzung der Flottenumstellung wichtige Aspekte wie Bürgerbeteiligung und Mitarbeiterqualifikation aufgegriffen und ein Zeitplan für die erste Phase der Umsetzung skizziert. Danach ist für die Phase 1 der Flottenumstellung eine Projektlaufzeit von mindestens 2,5 Jahren zu veranschlagen.

Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Um das zunehmende Mobilitätsbedürfnis in den wachsenden Ballungsräumen in Deutschland und Europa möglichst nachhaltig befriedigen zu können, wird ein leistungsfähiger öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) benötigt. Energieeffizienz und Umweltfreundlichkeit sind dabei von zentraler Bedeutung, um einen kostengünstigen Betrieb und gleichzeitig eine hohe Lebensqualität für die Bewohner zu gewährleisten. Vor dem Hintergrund anhaltender Überschreitungen der NO_x- und Feinstaubgrenzwerte in mehreren Städten und darauf bezogener Klagen von Umweltverbänden und Anwohnern sowie anhängiger EU-Vertragsverletzungsverfahren wird die Reduktion der lokalen Abgasemissionen auch für den ÖPNV immer dringlicher. Bei innerstädtischen Buslinien in Ballungszentren gewinnen daher Nullemissionskonzepte, d. h. Antriebstechnologien ohne lokale Schadstoffemissionen zunehmend an Bedeutung. So haben die in einem internationalen Netzwerk zusammengeschlossenen Städte im Rahmen der Initiative C40 (darunter Metropolen wie Paris, London, Los Angeles, Barcelona, Mexico City, Rom und Tokyo) eine Umstellung ihrer Busflotten auf emissionsfreie Antriebe beschlossen und wollen ab dem Jahr 2025 ausschließlich emissionsfreie Busse anschaffen [1]. Die Stadt Heidelberg hat sich der Initiative C40 ebenfalls angeschlossen und setzt schon heute verstärkt auf die Beschaffung emissionsfreier Nahverkehrsfahrzeuge im Fuhrpark ihres eigenen Unternehmens.

Ein Ergebnis der in 2018 durchgeführten technologieoffenen Voruntersuchung zum Einsatz von elektrisch angetriebenen Bussen in Heidelberg und Mannheim war, dass aufgrund der Länge und Dauer der Umläufe in Heidelberg Elektrobusse ohne Zwischenladung nur acht der insgesamt fast 100 Umläufe befahren können. Abgesehen von einem Gelenkbus-Umlauf sind jedoch sämtliche Umläufe in Heidelberg mit BZ-Bussen ohne Zwischenladung oder Nachtankung befahrbar [6]. Entsprechend soll mittelfristig die gesamte städtische Busflotte auf Elektroantrieb, vorzugsweise auf wasserstoffbetriebene Elektrobusse, umgestellt werden.

Aufgabenstellung

In dem Projekt sollte der Weg zur Umstellung der innerstädtischen Busflotte in der Stadt Heidelberg auf wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Busse untersucht werden. Die Untersuchung sollte technologieoffen für Brennstoffzellenhybrid (BZ)-Busse und für Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-REX) durchgeführt werden. Die Umstellung sollte in zwei Stufen ab dem Jahr 2020 erfolgen. Anhand der spezifischen lokalen Gegebenheiten und Anforderungen sollten die Möglichkeiten zum Aufbau der Wasserstoff- und ggf. Ladeinfrastruktur untersucht und dargestellt werden. Wesentliche Problematik war der fehlende Platz für die notwendige H₂-Infrastruktur auf dem bestehenden Betriebshof bzw. auf einem möglichen neuen Standort, für den jedoch stadintern noch keine Entscheidung gefallen war. Dabei war das Zusammenspiel aller beteiligten Akteure (Stadt, Verkehrsbetrieb, Tankstellenbetreiber bzw. Wasserstoffversorger) zu berücksichtigen.

Wissenschaftlicher und technischer Stand

Ein vollständiger Nullemissionsbetrieb ist nur mit einem vollelektrischen Antrieb realisierbar. Die benötigte elektrische Energie wird dabei entweder mittels einer Hochvoltbatterie im Bus gespeichert, über die Umwandlung von mitgeführtem Wasserstoff (H₂) in einer Brennstoffzelle (BZ), oder mittels einer Kombination dieser Verfahren bereitgestellt. Batterieelektrische Busse kommen bereits in vielen Städten zum Einsatz. Die chinesische Millionenmetropole Shenzhen hat als erste Stadt der Welt ihre gesamte Busflotte (rund 16.000 Busse) auf Elektroantrieb umgestellt. In Deutschland haben die Städte Hamburg und Berlin bereits 2016 die gemeinsame Beschaffungsinitiative für Elektrobusse gegründet (siehe nachfolgende Grafik) mit dem Ziel, ab 2020 ausschließlich emissionsfreie Busse anzuschaffen. Mittlerweile sind Verkehrsunternehmen aus München (MVG), Düsseldorf (Rheinbahn), Köln (KVG), Stuttgart (SSB) und Darmstadt (HEAG) der Initiative beigetreten, die damit die Betreiber von über 4.000 Bussen repräsentiert [2]. Der Fokus der Initiative liegt jedoch auf batterieelektrischen Bussen, wofür u. a. als gemeinsamer Standard eine Mindestreichweite von 150 km definiert wurde.

Beschaffungsinitiative – beteiligte und interessierte Verkehrsbetriebe



Quelle: Hamburger Hochbahn (<https://dialog.hochbahn.de/bus-in-zukunft/wie-wir-es-schaffen-ab-2020-nur-noch-emissionsfreie-busse-zu-kaufen/>)

Im März 2018 wurde in Heidelberg die Einführung einer zusätzlichen Elektrobuslinie für die Innenstadt im Rahmen eines Pilotprojekts beschlossen, auf der seit Januar 2019 drei batterieelektrische Busse betrieben werden [5]. Die Einführung dieser Linie stellt eine deutliche Kapazitätserweiterung auf einer der am stärksten nachgefragten Abschnitte im innerstädtischen ÖPNV der Stadt HD dar, jedoch müssen die Fahrzeuge nach einigen Stunden Einsatzzeit zum Nachladen auf den Betriebshof und werden durch ein weiteres Fahrzeug abgelöst.

Dies ist nur ein Beispiel dafür, dass sich abhängig von den Linienverhältnissen und den betrieblichen Randbedingungen bei weitem nicht alle aktuell bestehenden Umläufe mit rein batterieelektrischen Bussen bedienen lassen. Limitierend wirkt hier insbesondere die

begrenzte Reichweite der Batteriebusse, die bei BZ-Bussen etwa das Doppelte beträgt. Damit können BZ-Busse ohne weitere Zwischenladung bzw. -betankung auf den meisten innerstädtischen Umläufen eingesetzt werden, was für die Angebots- und Betriebsplanung der Verkehrsunternehmen eine wesentliche Erleichterung bedeutet. Wasserstoffbetriebenen BZ-Bussen wird daher generell eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung der ÖPNV-Busflotten zugeschrieben und sie stellen in vielen Fällen die bevorzugte Technologie dar.

Die Einführung insbesondere von wasserstoffbetriebenen Bussen stellt nach wie vor eine große ökonomische und betriebliche Herausforderung für den Nahverkehrsbetrieb dar. Bisherige Flotten von BZ-Bussen in Deutschland belaufen sich auf maximal fünf Fahrzeuge, so dass die RVK in Köln mit der Bestellung von 30 BZ-Bussen im Rahmen des Projekts JIVE schon den absoluten Spitzenreiter darstellt. Die Inbetriebnahme einer derart großen Stückzahl bedeutet daher ebenso wie die konsequente Umstellung der kompletten Fahrzeugflotte eine Pilotleistung, für die nahezu noch keine Erfahrungen vorliegen.

Aktuelle Entwicklungen und grundsätzliche Herausforderungen

Während Batteriebusse in Europa nahezu serienreif sind und in immer größeren Stückzahlen in Betrieb genommen werden, hat die Einführung wasserstoffbetriebener BZ-Busse immer noch Pilotcharakter, auch wenn diese seit 2019 im Rahmen der Projekte JIVE und später JIVE2 in größerem Maßstab eingesetzt werden sollten [3]. Dies liegt insbesondere auch daran, dass die erforderliche Infrastruktur sehr komplex ist und einer eigenständigen Planung sowie erheblicher Mittel für ihre Umsetzung bedarf.

Während auch die Inbetriebnahme von batterieelektrischen Bussen nicht immer reibungslos verläuft und sich Verzögerungen bei der Inbetriebnahme ergeben, ist die Umsetzung der JIVE-Projekte bei zahlreichen Betreibern mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, in deren Folge die Busse mit massiver Verzögerung in Betrieb genommen werden, oder die sich bei einigen Betreibern als so komplex erwiesen haben, dass das Projekt abgebrochen wurde.

Das wesentliche Problem ist das Oligopol einiger weniger Hersteller und die geringe reale Verfügbarkeit von Fahrzeugen am Markt. Dies führt z. B. dazu, dass auf eine Ausschreibung kein verwertbares Angebot eingeht, oder es zu erheblichen Verzögerungen und mangelnder Qualität bei der Auslieferung kommt. Den kleinen Fahrzeugherstellern ohne europaweites Distributions- und Werkstättenetz ist es jedoch auch nahezu unmöglich, die hohen Ansprüche der Betreiber hinsichtlich Verfügbarkeit mit einem angemessenen Aufwand sicherzustellen.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Umstellung der Linienbus-Flotte in Heidelberg auf Brennstoffzellen-Antrieb sollte aufbauend auf der Machbarkeitsstudie [6] ein Umsetzungskonzept für den Aufbau der Busflotten und der notwendigen H₂-Infrastruktur entwickelt werden. Dabei sollten die spezifischen lokalen Gegebenheiten und Anforderungen berücksichtigt werden. Insbesondere lässt der bisherige Betriebshof aus Platzgründen keinerlei zusätzliche Infrastruktureinrichtungen mehr zu.

Aufgrund des erheblichen Sanierungsbedarfs des Heidelberger Betriebshofs ist unklar, ob der Betriebshof am bestehenden Standort erneuert oder auf einen anderen, zu Projektbeginn noch nicht endgültig festgelegten Standort verlegt wird. Das vorgesehene Umsetzungskonzept muss daher unter Beachtung der Standortunsicherheit entwickelt werden. Es wird erwartet, dass ein Interimbetriebshof benötigt wird, der die H₂- und ggf.

auch Ladeinfrastruktur beheimatet. Es sollte geklärt werden, wo dieser im Stadtgebiet Heidelberg unter Beachtung der Betriebsabläufe platzierbar wäre und wie Abstellung, Betankung, Fahrfertigmachen der Fahrzeuge konkret erfolgen könnten.

Das Projekt wurde offiziell im Januar 2019 gestartet und hatte eine Projektlaufzeit von neun Monaten. In dieser Zeit fanden regelmäßige Abstimmungstelefonate mit allen Projektbeteiligten statt, wobei regelmäßig auch Vertreter der assoziierten Projektpartner zugegen waren. Dadurch war ein kontinuierlicher Informationsaustausch gesichert, durch den alle Beteiligten stets über den Fortgang des Projekts und aktuelle Fragestellungen informiert waren. Zudem wurden mehrere vor-Ort-Termine durchgeführt:

Anlass und Ort	Datum	Erläuterung	Ergebnisse
Kick-off, Mannheim	31.01.2019	Offizieller Projektauftritt mit allen Projektbeteiligten, Klärung Zeitplan und Verantwortlichkeiten	
vor-Ort-Besichtigung, Heidelberg	13.03.2019	Besichtigung des Geländes Wieblinger Weg möglicher Standort für den Interimsbetriebshof	Aufnahme grundsätzlicher baulicher Besonderheiten des Grundstücks
Stadtentwicklungs- und Verkehrsausschusses der Stadt Heidelberg, Heidelberg	03.04.2019	Vorstellung der Ergebnisse der Machbarkeitsstudie vor dem Stadtentwicklungs- und Verkehrsausschusses der Stadt Heidelberg	Der Ausschuss befürwortet die Umstellung der Busflotte und die Erarbeitung eines Grobkonzepts
Standortplanung, Waghäusel/Heidelberg	07.05.2019	Projekttreffen aller Projektteilnehmer in Heidelberg, Diskussion von Layout und Betriebsablauf	Konkrete Informationen zur Umsetzung (Leistung und Platzbedarf bzw. technische Umsetzung) der LIS waren noch offen, um eine Machbarkeit bewerten zu können.
Ladeinfrastruktur, Heidelberg	21.05.2019	Konkretisierung der Anforderungen und Rahmenbedingungen für die Ladeinfrastruktur	Festlegung einer LIS-Konfiguration (Ladeleistung und Bauform: Säule mit Poller)
Stadtwerke Netzanschluss, Heidelberg	02.07.2019	Informationen zu Möglichkeiten für die erforderlichen Netzanschlüssen auf dem vorgesehenen Grundstück	Bebauung der Hochspannungs- bzw. GHD-leitung ist tabu, grundsätzliche Machbarkeit bzgl. Platz- und Leistungsbedarf ist am Grundstück gegeben.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Vertreter der Stadt Heidelberg als assoziierter Projektpartner waren die Ämter für Umweltschutz sowie Verkehrsmanagement. Im weiteren Verlauf erfolgten zudem häufigere Informationsabfragen beim Liegenschaftsamt der Stadt Heidelberg als Grundstücksverwalter. Mit diesem wurden die mögliche Nutzung der Grundstücke als Betriebshof und die dafür erforderlichen Baumaßnahmen abgesprochen.

Ein intensiver Informationsaustausch erfolgte zudem mit den Stadtwerke Heidelberg als Betreiber der lokalen Gas- und Stromnetze. Die Eigenschaft als Gasnetzbetreiber erwies sich für das Vorhaben insofern als relevant, als durch das Grundstück eine Gashochdruckleitung führt, die besondere Nutzungseinschränkungen mit sich bringt (Verbot der Überbauung, Zugänglichkeit etc.). Als Stromnetzbetreiber sind sie zudem zuständig für die Einrichtung der erforderlichen Netzanschlüsse auf dem Gelände.

Es zeigte sich, dass für die Bewertung der grundsätzlichen Machbarkeit alle relevanten Stakeholder berücksichtigt wurden. Hier sei noch einmal betont, dass insbesondere die Stadtwerke (bzw. der jeweils lokale Netzbetreiber) hinsichtlich der Machbarkeit zwingend bereits bei ersten Überlegungen mit einbezogen werden sollten.

Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers

Die Studie dient zur Entscheidungsunterstützung hinsichtlich der Flottenumstellung der städtischen Busflotte der Stadt Heidelberg auf Nullemissionsantriebe. Bei einer Umstellung der Gesamtflotte können so rund eine Tonne NO_x-Emissionen pro Jahr vermieden werden, wodurch ein erheblicher Betrag zur Reduzierung der innerstädtischen Luftbelastung und zur Einhaltung der Stickstoffdioxid-Grenzwerte geleistet werden kann.

Hinsichtlich der Reduktion der Treibhausgasemissionen lassen sich je nach Fahrzeugtechnologie pro Jahr etwa 3.000 Tonnen CO₂e im Vergleich zur konventionellen Diesel Euro VI-Technologie einsparen. Voraussetzung dafür ist, dass entsprechend des Heidelberger "Masterplans 100 Prozent Klimaschutz" erneuerbarer Strom sowie grüner Wasserstoff (Wasserstoffherstellung mit erneuerbarer Energie) verwendet werden.

Die Studie wurde allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Die rnv wird die Ergebnisse der Studie bei ihrem weiteren Vorgehen zur Flottenumstellung berücksichtigen. Von Seiten der Beteiligten der Stadt Heidelberg erfolgte bislang keine Rückmeldung zur Studie. Es wird vermutet, dass der Bürgerentscheid gegen den vorgesehenen neuen Betriebshofstandort Ochsenkopf grundsätzlichere Fragen bzgl. des Gesamtbetriebshofs aufwirft, die die Flottenumstellung in den Hintergrund rücken lassen (der betrachtete Standort ist aufgrund seiner geringen Größe nicht als Gesamtbetriebshofs geeignet).

Erzielte Ergebnisse

Als möglicher Standort für einen Interimbetriebshof wurden von der Stadt Heidelberg (Amt für Verkehrsmanagement) zunächst zwei prinzipiell geeignete Grundstücke genannt:

- Grundstück 1: Kurpfalzring 71, 69123 Heidelberg (ehemals Villa Nachttanz)
- Grundstück 2: Wieblinger Weg 92, 69123 Heidelberg (zwischen OEG-Strecke rnv Linie 5 und Baumarkt Hornbach)

Die Untersuchung von Grundstück 1 wurde bei der vor-Ort-Besichtigung im Gespräch mit dem Liegenschaftsamt der Stadt Heidelberg jedoch wieder verworfen, da hierfür andere Verwendungen geplant sind. Das Projekt konzentrierte sich somit auf die Eignung des Geländes Wieblinger Weg 92 als einzig verbleibende Planungsalternative für den Interimsstandort.

Für die Umsetzung wurden drei Planungsvarianten miteinander verglichen:

- Variante A: Brennstoffzellen-Range-Extender mit Abstellung auf dem Interimsbetriebshof
- Variante B: Brennstoffzellenfahrzeuge mit Abstellung auf dem Interimsbetriebshof
- Variante C: Brennstoffzellenfahrzeuge reine Betankung und auf dem bisherigen Betriebshof Bergheim

Zunächst wurde anhand der Flottenstruktur und der aktuellen Umläufe der Energiebedarf der Fahrzeuge bestimmt. Es wurde von 21 Gelenkbussen ausgegangen, die bis zur geplanten Inbetriebnahme eines neuen Gesamtbetriebshofs in einem ersten Schritt (Phase 1) zu ersetzen sind, und für die der Interimsbetriebshof auszuliegen ist. Hierbei wurde die Erkenntnis aus [4] zugrunde gelegt, dass eine Umstellung auf Wasserstoff-Brennstoffzellenbusse möglichst in größeren Schritten erfolgen sollte. Eine kontinuierliche Umstellung führt zu beträchtlichen Überkapazitäten bei der lediglich modular anpassbaren H₂-Tankstelle.

Die Bestimmung des Energiebedarfs der Fahrzeuge erfolgt über ein Simulations-Tool der EvoBus. Die Berechnung des Verbrauchs der reinen Brennstoffzellenfahrzeuge (BZ) basiert ebenfalls auf den Berechnungen der EvoBus für das BZ-REX Fahrzeug. Für die Auslegung der Infrastruktur wird der Energiebedarf der Fahrzeuge im Sommerbetrieb (Vollklimatisierung nach VDV) betrachtet.

Auf Basis der Energiebedarfsbestimmung wurden die wesentlichen technischen Eckdaten der Wasserstoffversorgungs- und der Ladeinfrastruktur (einschließlich der notwendigen Netzanbindung) definiert. Es zeigte sich, dass eine Ladeleistung von 50 kW für die BZ-REX bei den bestehenden Umläufen ausreicht und sogar bei allen Fahrzeugen genügend zeitlicher Puffer vorhanden ist.

Darauf aufbauend wurde der Leistungsbedarf für die Flotte von bis zu 21 Fahrzeugen ermittelt. Einschließlich der auch für das BZ-REX-Fahrzeug notwendigen Anschlussleistung für die Tankstelle (ca. 250 kW) ergibt sich damit ein Gesamtleistungsbedarf von ca. 1,5 MW für Variante A. Dieser Leistungsbedarf wurde über eine Hausanschlussanfrage bei den Stadtwerken Heidelberg angemeldet und bestätigt. Im gemeinsamen Gespräch wurden wesentliche Randbedingung zur Einschleifung der notwendigen Mittelspannungsstation in das Netz der Stadtwerke Heidelberg diskutiert. Auf Basis der gesammelten Informationen und Aussagen der Stadtwerke Heidelberg, konnte die grundsätzliche Machbarkeit bestätigt werden. In Terminen mit EvoBus, Air Liquide und rnv wurde zudem ein Konzept für die Ausgestaltung der Ladepunkte entwickelt. Da auf dem Interimsstandort eine Außenabstellung geplant ist, wurde eine Ladung von oben kritisch gesehen. Die Lösung der Wahl ist eine Verteilung der Ladeleistung über im Boden verlegte Kabel an die Ladepunkte (Poller). An zentraler Stelle wird die Leistungselektronik inklusive der Steuerung der LIS vorgesehen. Dieses Konzept wird bereits bei den ersten drei Elektrobussen in Heidelberg eingesetzt.

Aus der Machbarkeitsstudie konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass eine lokale Erzeugung von Wasserstoff über Elektrolyse bei den vorliegenden Randbedingungen unrentabel ist. Aufgrund dessen wurde die Betrachtung der H₂-Infrastruktur auf die reine Tankstelle beschränkt. Zusammen mit Air Liquide wurde auf Basis der Energiebedarfsermittlungen in AP1 eine Tankstellenkonfiguration für die Varianten A, B und C erstellt. Hierzu wurden neben spezifischem Know-How von Air Liquide auch wesentliche

Informationen aus [4] verwendet. Die getätigte Auslegung berücksichtigt, dass eine maximale Betankungszeit von zehn Minuten bei beiden Antriebstechnologien eingehalten werden kann. Hierdurch sind nur geringfügige Veränderungen im Betriebsablauf im Vergleich zur Dieselbetankung notwendig.

Auf dem untersuchten Standort befinden sich zwei Gebäude des ehemaligen medizinischen Zentralarchivs. Eine Weiternutzung des großen Gebäudes zur Busabstellung erwies sich als nicht möglich. Um ausreichend Platz für die Abstellung der Fahrzeuge zu schaffen, müssen für die Planungsvarianten A und B die Gebäude somit abgerissen werden.

Für die Variante A wurde zusammen mit den Stadtwerken Heidelberg die mögliche Position des Mittelspannungsanschlusses festgelegt. Für die Varianten B und C wurde weiterhin die Möglichkeit zur Erstellung eines Niederspannungsanschlusses untersucht. Es zeigt sich, dass die technische Umsetzbarkeit aus Netzsicht grundsätzlich gegeben ist. Für alle drei untersuchten Varianten ist ein Anschluss mit der jeweils notwendigen Anschlussleistung an das bestehende Netz ohne zusätzliche Netzertüchtigungsmaßnahmen möglich.

Für die betrachteten Varianten erfolgte eine Grobplanung der entsprechenden Lade- und Wasserstoffinfrastruktur auf dem Gelände. Zusätzlich wurden Aufenthaltsräume für Mitarbeiter und Fahrer (ca. 20-50 m²) sowie ein Werkstattbereich für Kleinstarbeiten an den Fahrzeugen im Layout mitberücksichtigt. Alle drei Varianten erwiesen sich dabei hinsichtlich des Platzbedarfs und der Anordnung der Teilbereiche als durchführbar.

In Zusammenarbeit mit der rnv, den Stadtwerken und Air Liquide wurden dann die für die Ertüchtigung des Geländes zur Nutzung als Interimsbetriebshof erforderlichen Baumaßnahmen abgeschätzt. In der Planungsvariante C werden die BZ-Fahrzeuge am Standort Wieblinger Weg lediglich betankt, wodurch der aufwändige Abriss der Gebäude vermieden werden kann. Eine wesentliche Einschränkung für die Bebauung des Geländes ergibt sich durch die 110 kV-Stromleitung und die Gashochdruckleitung, die durch das Gelände verläuft. Eine Überbauung dieser Bestandsleitungen ist nicht gestattet, zudem müssen bestimmte Überdeckungsmaße eingehalten werden (SWHD 2018).

Der Kostenvergleich für die drei Planungsvarianten wurde analog der Machbarkeitsstudie anhand des Kapitalwerts (dargestellt anhand der Annuitäten) durchgeführt. Als Betrachtungszeitraum wurde die Lebensdauer der Fahrzeuge von 12 Jahren angesetzt, wobei für die Ladeinfrastruktur eine Lebensdauer von 15 Jahren angenommen wurde. Während bei den BZ nach der Hälfte der Lebensdauer (6 Jahren) entsprechend des heutigen Stands der Technik ein Austausch des Brennstoffzellenstacks angenommen wird, ist bei den BZ-REX nach Angaben von EvoBus aufgrund der verwendeten Festkörperbatterie und des optimierten Betriebs der Brennstoffzelle kein Komponententausch mehr erforderlich. Bei den Kosten für Fahrzeuge und Infrastruktur wird eine Förderung von 40 % entsprechend der derzeitigen Förderbedingungen unterstellt. Der verwendete Kalkulationszinsfuß beträgt 4 Prozent.

Das Ergebnis bestätigt die Aussage der Machbarkeitsstudie, dass mit beiden Technologieoptionen deutliche Mehrkosten gegenüber dem Dieselfahrzeug verbunden sind, die sich hauptsächlich aus den trotz Förderung höheren Anschaffungs- und Wasserstoffbezugskosten ergeben. Durch die vorübergehende Nutzung eines Interimsstandorts ergeben sich im Vergleich zum (hypothetischen) sofortigen Ausbau eines neuen Gesamtbetriebshofs Mehrkosten durch die für den Interimsstandort notwendigen Baumaßnahmen und Gutachten, den Netzanschluss, die Kabel, die Pacht, und das zusätzliche Personal (siehe unten). Diese Mehrkosten sind für beide Technologieoptionen mit jeweils knapp 13 % vergleichbar. Die Kosten für die BZ-Varianten B und C sind nahezu identisch: Die bei Variante B notwendigen Baukosten werden über die Betriebsdauer durch die Kosten für die zusätzlichen Überführungsfahrten in etwa ausgeglichen. Im Vergleich zwischen BZ-REX und BZ verursachen die BZ-REX rund 3 % geringere Kosten.

Wird angenommen, dass beim BZ-REX wie beim BZ ein Austausch von Brennstoffzelle und Batterie nach der Hälfte der Lebensdauer erforderlich ist, oder aber ist auch beim BZ ein Austausch der Brennstoffzellen nicht mehr notwendig, verliert der BZ-REX seinen Kostenvorteil und weist dann um 2-3 % höhere Kosten auf als der BZ. Bei einer Variation des H₂-Preises um ± 20 % oder einer Senkung des Ladestrompreises auf bis zu 6 ct/kWh erweisen sich die Ergebnisse hingegen als stabil.

Neben der Kostenbetrachtung wurden die NO_x- und Treibhausgasemissionen der beiden betrachteten Technologien mit dem Einsatz von Dieseln (Euro VI) verglichen. Durch den Betrieb der H₂-Busse werden bei einer kompletten Flottenumstellung rund eine Tonne NO_x-Emissionen pro Jahr vermieden. Sofern erneuerbarer Strom und grüner Wasserstoff verwendet werden, lassen sich mit beiden Fahrzeugtechnologien zudem etwa 3.000 Tonnen CO_{2e} pro Jahr im Vergleich zu konventionellen Dieseln mit Euro VI-Technologie einsparen.

Ein wesentliches Kriterium bei der Auswahl von alternativen Fahrzeugtechnologien ist neben technischen, ökonomischen und ökologischen Aspekten auch der notwendige Betriebsablauf. Der Betriebsablauf in Variante A muss aufgrund des zusätzlich notwendigen Ladevorgangs angepasst werden. Während bisher (bei Dieseln) der Fahrer das Fahrzeug abgestellt hat und der weitere Ablauf durch das Tankpersonal erfolgte, muss der Fahrer eines BZ-REX Fahrzeugs nach Abstellen des Fahrzeugs direkt den Ladevorgang starten. Der Ladevorgang wird je nach Einrückzeitpunkt aller Voraussicht nach einmalig für den Tankprozess unterbrochen werden. Das Tankpersonal beendet somit die erste Teilladung, tankt das Fahrzeug, stellt es wieder ab und startet die zweite Teilladung. Diese Besonderheit ist zum einen wichtig für die betroffenen Mitarbeiter und muss zudem bei einer möglichen Einführung von Smart Charging Systemen mitberücksichtigt werden. Für Variante B (Abstellung reiner BZ-Fahrzeuge) ergeben sich im Vergleich zum Dieseln keine wesentlichen Änderungen, sofern die oben geforderte Tankzeit eingehalten wird. In Variante C müssen zusätzliche Leerkilometer und somit zusätzliche Fahrzeiten für das Tankpersonal mitberücksichtigt werden. Dies führt zu höheren Personal- und Energieträgeraufwendungen.

Als weitere Aspekte für eine erfolgreiche Umsetzung der Flottenumstellung wurden die erforderlichen Genehmigungen sowie wesentliche Grundlagen für die Bürgerbeteiligung und Mitarbeiterqualifikation aufgegriffen.

Die notwendigen Baumaßnahmen sind nach Baurecht zu beantragen. Die Errichtung und der Betrieb der Wasserstofftankstelle bedürfen als überwachungsbedürftige Anlagen nach § 18 BetrSichV, Absatz 1, Nummer 3 zudem der Erlaubnis durch die zuständige Behörde. Eine Genehmigung nach BImSchG ist hier nicht erforderlich, da die gelagerte Wasserstoffmenge unter 3 Tonnen liegt. Angesichts des Umfangs der beabsichtigten Ladeinfrastruktur im Falle des BZ-REX wird empfohlen, die vorgesehene Installation zusammen mit den erforderlichen Baumaßnahmen mit der unteren Baubehörde abzuklären. Die Baumaßnahmen hängen jedoch von der noch auszuwählenden Variante ab, und für die Baugenehmigung ist eine Detailplanung anzufertigen.

Die durch den Interimbetriebshof zusätzliche auftretende Lärmbelastung im angrenzenden Wohngebiet Ochsenkopf wird als unkritisch erachtet, ist im Falle einer konkreten Planung jedoch ggf. durch ein Lärmgutachten abzuklären. In allen Planungsvarianten wurde vorsichtshalber eine Schallschutzwand in Richtung des Wohngebiets vorgesehen.

Aufgrund der lebhaften Diskussion um den zukünftigen neuen Betriebshof werden zusätzlich zur Einführung der Wasserstofftechnologie auch für den Interimbetriebshof Diskussionen um die Standortfrage erwartet. Für eine erfolgreiche Einführung der Wasserstofftechnologie und die Nutzung des vorgesehenen Geländes als Interimbetriebshof sind daher alle Stakeholder frühzeitig in das Projekt zu involvieren. Wesentliche Entscheidungsträger und

Genehmigungsbehörden wurden bereits im Rahmen der Konzepterstellung aktiv einbezogen, so dass hier bereits eine sehr frühzeitige grundlegende Information erfolgt ist. Dazu wurden zunächst entsprechend [4] die wesentlichen Interessengruppen für die notwendige Projektkommunikation identifiziert und Vorschläge für deren Ansprache unterbreitet.

Für die Mitarbeiter der rnv sind je nach Tätigkeitsbereich Schulungen u. a. in den Bereichen elektrische Antriebe, Hochvoltelektronik, Wasserstoff und Gasanlagen erforderlich. Die Fahrer der rnv erhalten bei jedem neuen Busmodell eine ca. halbtägige Einweisung auf das neue Fahrzeug. Der konkrete Schulungsbedarf ist unter Berücksichtigung der getroffenen Garantieregelungen, der Betriebsorganisation und der Vorbildung der Mitarbeiter festzulegen.

Zuletzt wurde ein Ablaufplan entworfen, der die jeweiligen Mindest-Zeitbedarfe zusammenfasst und somit einen groben Anhaltspunkt für den frühestmöglichen Zeitpunkt einer Flottenumstellung liefert. Danach dürfte der Interimsbetriebshof einschließlich Ladeinfrastruktur und H₂-Tankstelle theoretisch bis zu Lieferung der ersten Fahrzeuge fertiggestellt werden. Für die Lieferung der 21 Busse wird ein Zeitraum von 9 Monaten veranschlagt, so dass für die Phase 1 der Flottenumstellung eine Projektlaufzeit von mindestens 2,5 Jahren zu veranschlagen ist. Dies setzt jedoch voraus, dass serienreife Wasserstoffgelenkbusse auf dem Markt verfügbar sind.

Nutzen und praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das erstellte Umsetzungskonzept hat unmittelbar Relevanz für den öffentlichen Nahverkehr in der Stadt Heidelberg und die betriebliche Praxis der rnv. Die erarbeiteten Ergebnisse bilden eine wesentliche Grundlage für die anstehende Entscheidung insbesondere im Hinblick auf die Technologiewahl für die Fahrzeuge.

Da von den zunächst zwei möglichen Standorten für den Interimsbetriebshof einer ausgeschlossen werden musste, wurde damit auch die Standortfrage entschieden. Damit können alle weiterführenden Überlegungen und Planungen auf den verbleibenden Standort Wieblinger Weg 92 eingegrenzt werden.

Der Einbezug von Vertretern aller relevanten Akteursgruppen (Verkehrsbetrieb, Kommune, Bushersteller, Wasserstofflieferant, H₂-Tankstellenbauer) in das Umsetzungskonzept ermöglichte ein abgestimmtes Vorgehen und bildet eine wesentliche Grundlage für eine erfolgreiche Umsetzung der Einführung alternativer Busantriebe auf dem vorgesehenen Interimsbetriebshof.

Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Das Vorhaben wurde bei verschiedenen Veranstaltungen präsentiert:

- Im Februar 2019 auf der Sitzung der AG 3 „Wasserstoff und Brennstoffzelle“ im Rahmen des Strategiedialogs Automobilwirtschaft
- Im März 2019 beim Statuskolloquium Umweltforschung Baden-Württemberg 2019
- Im April 2019 auf einer Sitzung des Stadtentwicklungs- und Verkehrsausschusses der Stadt Heidelberg präsentiert.

Die Ergebnisse werden in den nächsten Wochen und Monaten im Rahmen der Diskussion um die Flottenumstellung in den Gremien der rnv und der Stadt Heidelberg vorgestellt und diskutiert.

Eine darüberhinausgehende Veröffentlichung der Ergebnisse ist nicht vorgesehen. Dies ist auch darin begründet, dass die verwendeten Zahlengrundlagen aufgrund bestehender Vertraulichkeitsvereinbarungen nicht veröffentlicht werden dürfen.

Ergebnis- und Forschungstransfer

Im Ergebnis liefert das Vorhaben insbesondere ein Grobkonzept für die hälftige Umstellung der innerstädtischen Busflotte in der Stadt Heidelberg auf Wasserstoffantrieb unter Nutzung eines Interimsbetriebshofs. Hierzu wurden zwei unterschiedliche Technologien und insgesamt drei Varianten betrachtet, wodurch für den Wasserstoff-, Strom- und Flächenbedarf eine große Spannweite zu berücksichtigen war. Nach der entwickelten Grobplanung sind alle Varianten auf dem vorgesehenen Gelände umsetzbar. Die Studie stellt somit eine fundierte Basis für die zu treffende Entscheidung des Heidelberger Gemeinderats hinsichtlich des Interimsbetriebshofs als auch für die dann zu erfolgende Detailplanung dar. Für die letztliche Umsetzbarkeit ist u. a. die Finanzierbarkeit ausschlaggebend, die in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt wurde.

Die gewählte Vorgehensweise kann jedoch bei weiteren Standortplanungen oder Umsetzungskonzepten in anderen Städten (z. B. am Standort Mannheim der rnv) angewendet werden. Auch eine Übertragung auf weitere Elektromobilitätsprojekte ist prinzipiell denkbar. Aufgrund der u. U. deutlich komplexeren Rahmendbedingungen (verschiedene Flottenbetreiber, Individualpersonen, verschiedenste Fahrzeugmodelle mit unterschiedlichen Ansprüchen an Tank- und Ladeinfrastruktur, kein geregelter Betriebsablauf) würde dies jedoch eine weitreichende Ausweitung des Untersuchungsrahmens und einen erheblichen Mehraufwand erfordern.

Referenzen

- [1] C40 Cities: Fossil Fuel Free Streets Declaration. Online unter www.c40.org/other/fossil-fuel-free-streets-declaration, zuletzt abgerufen am 02.10.2018
- [2] Hamburger Hochbahn: Ab 2020 nur noch emissionsfreie Busse: Wie wollen wir das schaffen? 17.01.2018. Online unter dialog.hochbahn.de/bus-in-zukunft/ab-2020-nur-noch-emissionsfreie-busse-wie-wollen-wir-das-schaffen/, zuletzt abgerufen am 02.10.2018
- [3] JIVE/JIVE2: Update on project progress and latest status. Rotterdam, 25.09.2018
- [4] Reuter, B. et al., 2017. New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots - Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling, s.l.: s.n.
- [5] rnv ist elektrisiert: Erstes Fazit zum neuen E-Bus. 01.02.2019. Online unter <https://www.heidelberg24.de/heidelberg/heidelberg-erstes-fazit-rnv-zum-neuen-elektrobus-linie-20-11648977.html>, zuletzt abgerufen am 17.09.2019
- [6] thinkstep: Machbarkeitsstudie Einsatz H2/BZ-Busse bei der rnv. Leinfelden-Echterdingen, 2018
- [7] SWHD, 2018. Anweisung zum Schutz unterirdischer Versorgungseinrichtungen der Stadtwerke Heidelberg Netze (Leistungsschutzanweisung) - Stand 20.08.2018, Stadtwerke Heidelberg.