ImplaN

Initialinfrastruktur für Wasserstoffmobilität auf Basis planbarer Nachfrager

Förderkennzeichen

03ZZ0727

Abschlussbericht

01.10.2016 – 31.03.2019

Gefördert vom: Bundesministerium für Bildung und Forschung

Vertreten durch: Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich

Im Rahmen von: zwanzig20 PARTNERSCHAFT FÜR INNOVATION, HYPOS

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Reiner Lemoine Institut gGmbH
Rudower Chaussee 12
12489 Berlin

REINER LEMOINE INSTITUT

Abschlussbericht ImplaN

01.10.2016 – 31.03.2019

REINER LEMOINE INSTITUT

Abschlussbericht ImplaN

01.10.2016 – 31.03.2019

Zuwendungsempfänger	Reiner Lemoine Institut gGmbH Rudower Chaussee 12, 12489 Berlin Projektleitung: Jörn Hartmann, M.Sc.
Förderkennzeichen	03ZZ0727
Vorhabenbezeichnung	Initialinfrastruktur für Wasserstoffmobilität auf Basis planbarer Nachfrager
Laufzeit des Vorhabens	01.10.2016 - 31.03.2019

Berlin, 27. September 2019

Jörn Hartmann (Projektleitung)	Dr. Kathrin Goldammer (Geschäftsführung)

Inhalt

Abbildungsverzeichnis 2
Tabellenverzeichnis 3
Abkürzungsverzeichnis 3
1. Zusammenfassung 4
2. Ergebnisübersicht und Handlungsempfehlungen 6
3. Einleitung und Rahmenbedingungen 7
3.1 Projekthintergrund 7
3.2 Stand der Forschung 7
3.3 Aufgabenstellung, Vorhabenplanung und -ablauf 9
3.3.1 Geplanter Projektablauf 9
3.3.2 Tatsächlicher Projektablauf 10
4. Eingehende Darstellung der Projektinhalte 11
4.1 Nachfragepotential von Fahrzeugflotten quantifizieren 11
4.2 HRS-Auslegung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 15
4.2.1 Methodik: HRS-Auslegung 15
4.2.2 Ergebnisse: Wirtschaftlichkeit von HRS für Flotten 18
4.3 HRS-Netzwerkauslegung 20
4.3.1 Methodik: Bewertung des Netzwerknutzens 21
4.3.2 Methodik: HRS-Netzwerkauslegung 23
4.3.3 Szenarien und Annahmen 25
4.3.4 Ergebnisse: HRS-Netzwerkauslegung 27
5. Ergebnisverwertung 34
5.1 Veröffentlichungen 34
5.1.1 „International Journal of Hydrogen Energy“ 34
5.1.2 Beitrag im Journal „Applied Energy“ 34
5.1.3 Vorstellung der Projektergebnisse auf Veranstaltungen und Konferenzen 34
5.1.4 Verwertbarkeit der entwickelten Methoden & Ergebnisse 35
6. Literaturverzeichnis 36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Flottenbestände (qualitativ) untersuchter Städte im Betrachtungsgebiet 13

Abbildung 2: Schematische Darstellung des Simulationsmodells einer HRS für Busse, Pkw und Pkw-Flotten 16

Abbildung 3: Wirtschaftlichkeit von HRS zur Versorgung von Carsharing-Pkw und Taxis (links) bzw. von Taxis und Bussen (rechts) 19

Abbildung 4: Wirtschaftlichkeit von HRS zur Versorgung von Carsharing-Pkw und Taxis bei einem H2-Preis von 11,00 €/kg (links) bzw. von Taxis und Bussen bei einem H2-Preis von 10,50 €/ kg (rechts) 20

Abbildung 5: Bevölkerungsverteilung [31], [30] 22

Abbildung 6: Realistische Routenverläufe entlang des Straßennetzes (Bsp. Berlin - Saarbrücken) [31] 23

Abbildung 7: Angenommener Bestand an HRS in den Szenarien 1 (grüne und weiße Kreise) und 2 (grüne Kreise). Quadrate markieren die betrachteten Städte 27

Abbildung 8: Für Carsharing erforderliche Anzahl HRS 28

Abbildung 9: Für einen Taxibetrieb erforderliche Anzahl HRS 28

Abbildung 10: Für einen Busbetrieb erforderliche Anzahl HRS 28

Abbildung 11: Beispiel Berlin: Einwohnerdichte (oben links) sowie Anzahl und Position von HRS für Carsharing (oben rechts), Taxi (unten links) und Bus (unten rechts). Taxistände sind als kleine graue Kreise dargestellt (© OpenStreetMap-Mitwirkende), Busdepots als große graue Kreise. Bestehende HRS sind als nicht ausgefüllte, zusätzliche HRS als blau ausgefüllte, kleine Kreise dargestellt. 29

Abbildung 12: Optimierungsergebnisse 31

Abbildung 13: Netzwerkgestalt für ein Ergebnis mit geringem Bezuschussungsbedarf 31

Abbildung 14: Netzwerkgestalt für ein Ergebnis mit geringem Bezuschussungsbedarf aber vergleichsweise hohem Nutzen 32

Abbildung 15: Netzwerkgestalt für ein Ergebnis mit mittlerem Bezuschussungsbedarf 33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fahrzeugbestände 12
Tabelle 2: Kostenannahmen 16

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
CAPEX	Capital Expenditures – Investitionskosten
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle – Brennstoffzellenfahrzeug
GIS	Geographisches Informationssystem
HRS	Hydrogen Refuelling Station
LCOH2	Levelized Cost of Hydrogen – Wasserstoffgestehungskosten
OPEX	Operational Expenditures – Betriebskosten
RLI	Reiner Lemoine Institut
WEA	Windenergieanlage

1. Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens „ImplaN – Initialinfrastruktur für Wasserstoffmobilität auf Basis planbarer Nachfrager“ war die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen einer steigenden Nachfrage von Wasserstoff und der Anzahl von Wasserstofftankstellen (Hydrogen Refuelling Station – HRS) in Deutschland. Tankstellenbetreiber haben keinen Anreiz, Wasserstoff anzubieten, solange keine Nachfrage danach besteht und potentielle Kundinnen und Kunden haben keinen Anreiz, ein Brennstoffzellenfahrzeug (Fuel Cell Electric Vehicle – FCEV) zu kaufen, solange es in Deutschland keine Tankinfrastruktur dafür gibt. Aus diesem Grund wurden planbare Nachfrager identifiziert, die bereits die Grundauslastung eines initialen Tankstellennetzes für Wasserstoff und damit dessen wirtschaftlichen Betrieb gewährleisten können. Gemeint sind Flottenbetreiber, deren Fahrzeuge Strecken und Nutzungsdauer aufweisen, die stets ähnlich und somit gut planbar sind – wie etwa Busse, Taxis und Carsharing-Flotten. Fahren sie mit Wasserstoff, ergeben sich für Tankstellen verlässliche Kunden. Vor allem benötigen Flotten im Gegensatz zu privaten Pkw nur eine lokal begrenzte Infrastruktur, sodass diese Schritt für Schritt aufgebaut werden kann. Idealerweise steht am Ende dieses Aufbauprozesses ein Tankstellennetz, das auch privaten Pkw-Nutzerinnen und Nutzern zugutekommt. Im Projekt wurden daher konkrete Umsetzungsmöglichkeiten für Kombinationen aus Fahrzeugflotten und Tankstellen identifiziert. Hierzu wurden vor dem Hintergrund von Datenrecherche und -aufbereitung Nachfragepotentiale der Flotten in der Untersuchungsregion (HYPOS Region: Ostdeutschland) ermittelt. Nach der Identifikation von möglichen Tankstellenstandorten wurde ein Simulationsmodell einer HRS erstellt. Auf Basis synthetisierter Wasserstoffbedarfe verschiedener Flottenkombinationen (Taxis, Busse und Carsharing-Fahrzeuge) wurden die Wasserstoffgestehungskosten (Levelized Costs of Hydrogen – LCOH2) sowie die Wirtschaftlichkeit des jeweiligen HRS-Betriebs (Gewinn/Verlust) bestimmt. Mittels GIS-Analysen und Mehrzieloptimierungen wurden Tankstellennetze mit unterschiedlichen HRS-Standorten entworfen, die den Bedarf der planbaren Flotten decken. Diese wurden anschließend hinsichtlich der Gesamtkosten für die Infrastruktur wie auch den Nutzen für den motorisierten Individualverkehr (MIV) verglichen. Zusätzlich wurde untersucht, welche Standorte einen besonderen Nutzen für das HRS-Gesamtnetzwerk haben, d.h. durch welche Positionen können möglichst viele Fernfahrten ermöglicht werden.

Die ökonomische Analyse zum Ausbau eines HRS-Netzes für Flotten zeigte, dass bei den betrachteten Flottenkombinationen, welche durch einen Algorithmus nach möglichst hoher Wirtschaftlichkeit ausgewählt wurden, von je zwei Flottentypen (Carsharing-Fahrzeuge und Taxis; Busse und Taxis) unter den aktuellen Rahmenbedingungen keine Wirtschaftlichkeit möglich ist. Die Wasserstoffgestehungskosten (Levelized Costs of Hydrogen – LCOH2) liegen in jedem Fall über dem festgelegten Wasserstoff-Verkaufspreis von 7,98 € netto [1]. Die hohen LCOH2-Kosten sind unter anderem auch auf Umlagen und Netzentgelte zurückzuführen. Hierdurch konnte bei keiner der betrachteten Flottenkombinationen eine Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Zudem führt die Preisdifferenz zwischen LCOH2 und Verkaufspreis dazu, dass eine

höhere Wasserstoffabnahme durch größere Flotten zu einem höheren Verlust führt. Lediglich bei kleinen Flotten konnte durch eine bessere Auslastung des eingesetzten Elektrolyseurs eine Senkung des Verlusts erreicht werden. Wird der Wasserstoff-Verkaufspreis um etwa 2,50 €/kg (netto) erhöht oder die LCOH2 gesenkt, so können einige der simulierten Kombinationen aus Flotten und HRS einen wirtschaftlichen Betrieb erreichen.
Bei der HRS-Netzwerkauslegung kann festgehalten werden, dass größere Städte mehr HRS erfordern, um den Anforderungen von Taxis und Carsharing-Fahrzeugen zu genügen. Werden ähnlich großen Städten (etwa 200.000 Einwohner) miteinander verglichen, variieren die Ergebnisse der benötigen HRS. Beispielsweise genügt für den Carsharing-Betrieb teils eine HRS, teils sind drei HRS erforderlich. Für Busse genügt meistens gemäß den Annahmen eine HRS in der Nähe eines Busdepots. Durch eine ungünstige Position von Bestandstankstellen kann es allerdings dazu kommen, dass weitere HRS vorgesehen werden müssen. Des Weiteren kann gezeigt werden, dass bestimmte Standorte von HRS einen besonderen Nutzen für private Nutzer und Nutzerinnen als auch für das Gesamtnetzwerk aufweisen. Das bedeutet, dass mehr Personen der Umstieg auf ein FCEV ermöglicht wird und mehr Fernfahrten getätigt werden können, als bei anderen Standorten. Wird das bestehende Netzwerk beispielsweise um drei HRS erweitert, zwei in Rostock und eine in Halle an der Saale, so können 1,3 Mio. Personen der Umstieg auf ein FCEV ermöglicht werden. Werden die HRS in Halle an der Saale, Dresden und Jena errichtet, können bei gleichen Kosten 2,3 Mio. Personen auf ein FCEV umsteigen.

Es wurde gezeigt, dass die Phase geringer Wasserstoffnachfrage durch private Pkw durch die Flottennutzung abgefangen werden kann. So ist der Betrieb einer HRS über einen langen Zeitraum möglich, was die Voraussetzung für einen zukünftigen Markthochlauf von FCEV darstellt.

Das Projekt wurde am Reiner Lemoine Institut vom 01.10.2016 bis 31.03.2019 durchgeführt. Die inhaltliche Bearbeitung des Projekts unterlag Fabian Grüger.

2. Ergebnisübersicht und Handlungsempfehlungen

Erkenntnis 1

Bei einem Wasserstoffverkaufspreis von 7,98 € (netto) ist ein wirtschaftlicher Betrieb von Wasserstofftankstellen nicht möglich.

Handlungsempfehlungen

1. Eine Erhöhung des Verkaufspreises sollte in Betracht gezogen werden.
2. Die Entwicklung günstigerer HRS-Komponenten sowie die Implementierung neuer rechtlicher und finanziellen Rahmenbedingungen, um die LCOH2 zu verringern, sollte forciert werden.
3. Die Subventionierung der HRS-Betreiber sollte geprüft werden.

Erkenntnis 2

Je größer die Flotte und damit der H2-Umsatz sind, desto größer sind die Verluste des HRS-Betreibers.

Handlungsempfehlungen

1. Siehe Erkenntnis 1.

Erkenntnis 3

Je höher die Auslastung bei kleineren Flotten ist, desto geringer werden die Verluste des HRS-Betreibers.

Handlungsempfehlungen

1. Ein initialer Infrastrukturaufbau sollte mit kleinen Flotten und großer Auslastung beginnen.

Erkenntnis 4

Die richtige Positionierung von HRS hat einen großen Einfluss auf ihren Nutzen für Nutzer und Nutzerinnen als auch auf das Gesamtnetzwerk.

Handlungsempfehlungen

1. Die Positionierung neuer HRS sollte durch Simulation und Optimierungen bestimmt werden. Zukünftig könnten hier auch weitere Daten, wie z.B. Fahrzeugrouten, Laufleistungen und Fahrzeugtypen in die Analysen eingebunden werden.

3. Einleitung und Rahmenbedingungen

Ein Ziel der Förderinitiative Zwanzig20 ist es, ostdeutsche Stakeholder und ihre jeweiligen Kompetenzen zu vernetzen, um volkswirtschaftlich und gesellschaftlich bedeutende Herausforderungen zu adressieren. Die Fördermaßnahme Zwanzig20 zielt darauf ab, dass die zu entwickelnden Lösungen wirtschaftlich tragfähig sind. Den in hohem Maße von fossilen Kraftstoffen abhängigen Verkehrssektor auf erneuerbare und heimische Energiequellen umzustellen, kann als besonders schwierige und bedeutsame Herausforderung betrachtet werden. Wasserstoff als Kraftstoff kann dies ermöglichen, erfordert aber eine Tankinfrastruktur. Indem es kurz- bis mittelfristige Potentiale für grünen Wasserstoff im Verkehrssektor ermittelt und wirtschaftliche Anwendungsfälle identifiziert, leistet dieses Vorhaben einen entscheidenden Beitrag zur Lösung dieses Problems. Das bedeutet, dass Einsatzmöglichkeiten für innovative Wasserstofftechnologien, die teilweise auch im Rahmen anderer Fördervorhaben von Zwanzig20 entwickelt werden, aufgezeigt und bewertet werden.

3.1 Projekthintergrund

Dieses Vorhaben identifizierte geeignete Möglichkeiten eines Infrastrukturaufbaus – welches auf Basis von planbaren Nachfragern (Flotten) zusätzlich darauf bedacht ist, einen möglichst großen Nutzen für zukünftige private Nutzer und Nutzerinnen von FCEV zu generieren. Dass die HYPOS-Region nicht im Infrastrukturausbau zurückbleibt, ist ebenso wichtig für eine flächendeckende H2-Versorgung in Deutschland, Ostdeutschland im Besonderen. Viele Stakeholder aus unterschiedlichen Bereichen, insbesondere mittelständische Unternehmen, können von diesem Forschungsprojekt profitieren. Dazu zählen beispielsweise Elektrolysehersteller, Baubetriebe, Kommunen und ihre Bürgerinnen und Bürger, Verkehrsbetriebe sowie Zulieferer für Wasserstoffkomponenten. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind übertragbar und geben somit Impulse für das gesamte Bundesgebiet.

3.2 Stand der Forschung

Die Literatur zeigt, dass die Kraftstoffverfügbarkeit und damit die Initialinfrastruktur maßgeblich für den Erfolg einer Markteinführung von FCEV sind [2], [3]. In Deutschland sollen im Rahmen der Initiative H2 MOBILITY bis 2023 ca. 400 HRS errichtet sein (Stand 2019: 75 HRS). Selbst wenn diese Ziele erreicht werden, sind die Mindestvoraussetzungen an eine HRS -Infrastruktur noch nicht erfüllt. Auf Basis von Huétink et. al. [2] lässt sich abschätzen, dass erst ab einer Initialinfrastruktur von mindestens 1.200 bis 2.600 HRS ein erfolgreicher Marktstart von FCEV möglich ist. Andere Quellen nennen 1.000 HRS als mindestens erforderlich. Im Ausbauplan ist das HYPOS-Gebiet zudem unterrepräsentiert. Nur 16 % der HRS liegen demnach bis 2018 in diesem Gebiet, während 20 % der Einwohner und 30 % der Fläche auf dieses Gebiet entfallen .

Im Folgenden werden bisherige Untersuchungen zur Infrastruktur in Deutschland vorgestellt und im Kontext dieses Vorhabens ausgewertet. Unter Berücksichtigung der Auflagen des wissenschaftlichen Beirats von HYPOS wurden u.a. Arbeiten des „Instituts für Energie- und Klimaforschung – Elektrochemische Verfahrenstechnik“ (IEK-3) des Forschungszentrums

Jülich betrachtet. Bisherige Analysen behandeln einen optimalen Ausbau für hohe Marktdurchdringungen in der Zukunft. Die Studie GermanHy [4] berücksichtigt unterschiedliche H2-Quellen und Transport- sowie Verteiloptionen und leitet eine Roadmap für Wasserstoffinfrastruktur bis zum Jahr 2050 ab. Die methodischen Grundlagen für derartige Betrachtungen werden in Seydel et. al. [5] gelegt. Der Tankstellenaufbau und die Nachfrage werden geografisch aufgelöst. Die Nachfrage wird jedoch auf Basis von Zulassungszahlen konventioneller Fahrzeuge exogen vorgegeben. Krieg [6] und Baufumé et. al. [7] bewerten und optimieren Pipeline- und Tankstelleninfrastruktur für das Jahr 2050. Die H2-Nachfrage wird auf Basis von Zulassungszahlen und Marktdurchdringungsannahmen abgeschätzt und für die Infrastrukturentwicklung vorausgesetzt. Diese Pipeline-Untersuchungen werden am IEK-3 weitergeführt, erweitert und detailliert (noch nicht veröffentlicht). Robinius [8] identifiziert und konzeptioniert Strom- und Gasmarktdesigns zur Versorgung eines größtenteils auf FCEV basierenden Verkehrssektors mit Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen. Dabei wird auch die Entwicklung der Nachfrage modelliert und örtlich aufgelöst. Die zuvor genannten Arbeiten bieten einen langfristigen Blick auf Wasserstoffinfrastruktur, adressieren allerdings nicht die Initialphase mit ihren besonderen Herausforderungen. Insbesondere das Problem geringer Tankstellen-Auslastung zu Beginn, wenn dem Infrastrukturaufbau kaum Kraftstoffnachfrage gegenübersteht, wird vernachlässigt. Die besonderen Chancen, die Fahrzeugflotten in diesem Zusammenhang bieten, werden teils erwähnt, aber nicht näher betrachtet. Gleichzeitig gibt es Bestrebungen, FCEV-Flotten einzusetzen. In mehreren deutschen Städten werden Wasserstoffbusse eingesetzt [9], [10], [11], während in München eine Carsharing-Flotte mit Wasserstoff als Kraftstoff betrieben werden soll [12].
Andere Veröffentlichungen behandeln die Initialphase, z.B. indem Clusteransätze untersucht werden. Diese sehen vor, dass H2 als Kraftstoff nicht flächendeckend, sondern in abgegrenzten Gebieten eingeführt wird [13], [3]. Der sukzessive Aufbau wird in Stephens-Romero et. al. [3] zwar betrachtet, basiert aber auf einer angenommenen Nachfrage durch private Fahrer. Diese Ansätze gehen davon aus, dass Einschränkungen in der Kraftstoffverfügbarkeit von FCEV-Fahrern akzeptiert werden. In Lines et. al. [14] wird eine Mietwagen-Flotte als möglicher Erstnachfrager von Wasserstoff betrachtet. Es handelt sich jedoch um ein Fallbeispiel, das so nicht auf Deutschland übertragbar ist. Huétink [2] widmet sich mittels agenten-basierter Modellierung dem Thema Initialinfrastruktur und schätzt die erforderliche Tankstellenverfügbarkeit ab. Wie und wo diese Infrastruktur jedoch errichtet werden sollte, wird nicht untersucht. Ergebnisse der genannten Untersuchungen sind u.a.:

- Cluster-Ansätze können den Investitionsaufwand begrenzen.
- Onsite-Elektrolyse ist geeignet für erste HRS, da keine weitere Infrastruktur (Pipelines, Trailer Belieferung mit zentraler Erzeugung) erforderlich ist.
- Initialinfrastruktur ist eine wichtige Voraussetzung für einen Erfolg von Wasserstoff im Verkehr.

- Flotten können als erste Nachfrager geeignet sein, um die Auslastung von HRS in der Initialphase zu überwinden.

Flotten als mögliche Erstnachfrager wurden bislang nicht detailliert betrachtet, insbesondere nicht im Zusammenhang mit der dazu nötigen Tankinfrastruktur. Weder wurden verschiedene Flottentypen untersucht und bewertet noch wurde ermittelt, wie Tankstellen für Flottenfahrzeuge aufgebaut und wo sie errichtet werden sollten, um auch späteren privaten Nachfragern zu nützen. Genau diese Fragestellungen wurden in diesem Vorhaben erstmals detailliert betrachtet.

3.3 Aufgabenstellung, Vorhabenplanung und -ablauf

In diesem Vorhaben wurden planbare Nachfrager in Form von Fahrzeugflotten als mögliche Erstnachfrager betrachtet und bewertet. Es wurde untersucht, in welchem Maße diese die Wirtschaftlichkeit von Infrastruktur erhöhen können und welchen Beitrag Flotten-Infrastruktur zur flächendeckenden Versorgung von späteren privaten FCEV-Nutzerinnen- und -Nutzern leisten können.

Dazu wurden zunächst erforderliche Daten, z.B. örtlich aufgelöste Bevölkerungsdaten, Jahresfahrprofile der Bus-, Taxi- und Carsharing-Bestand ermittelt und aufbereitet. Anhand dieser Daten wurden Wasserstoff-Nachfrage-Profile örtlich und zeitlich aufgelöst synthetisiert und in Zeitreihen überführt. Ein weiterer wichtiger Baustein war die Betrachtung der HRS. Basierend auf bestehenden Modellen wurden Tankstellen mit ihren H2-Komponenten modellhaft abgebildet. So bestand später die Möglichkeit, die Topologie bzw. Dimensionierung der H2-Infrastruktur passend zur Nachfrage auszulegen. Der dazu erforderliche Mehrzieloptimierungsalgorithmus wurde auf Basis bestehender Arbeiten an die Fragestellung angepasst. Es wurde eine Methodik entwickelt und angewendet, mit der sich der Nutzen von HRS-Infrastruktur für spätere private Nachfrager quantifizieren lässt. Sowohl die Position der Tankstellen als auch ihre Dimensionierung floss in diese Bewertung ein. Die genannten Elemente wurden in ein übergeordnetes Simulationsmodell integriert. Dieses umfasst alle Teilmodelle (z.B. Tankstellenmodell) und ist an ein Geoinformationssystem (GIS) gekoppelt. Mit Hilfe dieses Modells können Tankstellen-Infrastruktur (Position, Dimensionierung) und die Flotten-Nachfrager-Struktur optimiert werden. Auf diese Weise wurden unterschiedliche Flotten- und Gebietstypen hinsichtlich einer Umstellung auf Wasserstoff bewerten sowie die Kosten und das Potential des Konzepts für die HYPOS-Region und Deutschland bestimmt. Aus diesen Ergebnissen wurden Handlungsempfehlungen abgeleitet und publiziert.

3.3.1 Geplanter Projektablauf

AP 1 – Vorbereitung und Datenrecherche

Inhalt von AP 1 war es, alle für die erfolgreiche Durchführung des Projektes notwendigen Daten und Informationen zu recherchieren, auszuwerten und für die Verwendung aufzuarbeiten.

AP 2 – Nachfragepotential quantifizieren

In AP 2 war die zeitlich und örtlich aufgelöste Bestimmung des Nachfragepotentials vorgesehen sowie das Fertigstellen der Modelle für die Simulation verschiedener Tanklastgänge zum Einbau in ein übergeordnetes Simulationsframework.

AP 3 – Simulationsmodell Tankstelle und Strombezugsmöglichkeiten

AP 3 diente der Erstellung des Modells einer HRS zum Einbau in ein übergeordnetes Simulationsframework sowie der Modellierung verschiedener Strombezugsmöglichkeiten.

AP 4 – GIS-Modellierung und Programmierung

Inhalt von AP 4 war die Erstellung eines funktionsfähigen Simulationsframework mit GIS-Integration sowie die Aufbereitung und Integrierung von Geo-Daten und Teilmodellen.

AP 5 – Simulation und Optimierung

AP 5 diente der Auslegung der Tankinfrastruktur: Das Simulationsmodell erzeugt pareto-optimale Topologien (Tankstelleninfrastruktur + Flotten) und quantifiziert Kennwerte (Invest- und Betriebskosten, etc.).

AP 6 – Auswertung und Handlungsempfehlungen

In AP 6 war die Auswertung der Simulationsergebnisse, die Ableitung von Handlungsempfehlungen und die Publikation von Erkenntnisse und Ergebnisse.

3.3.2 Tatsächlicher Projektablauf

Der tatsächliche Projektablauf deckte sich mit dem geplanten Projektablauf.

4. Eingehende Darstellung der Projektinhalte

Beim Aufbau eines Netzes aus HRS besteht ein wechselseitiges Problem mit dem Markthochlauf von FCEV. Solange nur wenige Fahrzeuge vorhanden sind, können bestehende HRS nicht ausgelastet werden, sodass deren Betrieb unwirtschaftlich ist. Umgekehrt lassen sich FCEV nicht so einsetzen wie konventionelle Fahrzeuge, solange das Netzwerk aus HRS unzureichend dicht ist. Mit Flottenfahrzeugen wie Busse, Taxis und Carsharing-Fahrzeuge lassen sich beide Probleme adressieren: Die Fahrzeuge bedingen eine regelmäßige Wasserstoffnachfrage und können so HRS auslasten. Gleichzeitig erfordern diese Fahrzeugtypen nur lokale Infrastruktur und kein flächendeckendes Netzwerk. Beispielsweise benötigt ein Stadtbus in München auch nur in dieser Stadt eine HRS.

Ziel dieses Vorhabens war, das kurzfristige Nachfragepotential von Bus-, Taxi- und Carsharing-Flotten in den neuen Bundesländern zu quantifizieren und zeitlich wie örtlich aufzulösen. Es sollte dann ermittelt werden, welche der Nachfrager für die Initialphase besonders geeignet sind und wie eine dazu passende Tankinfrastruktur gestaltet sein sollte. Dabei sollen auf der einen Seite die Wirtschaftlichkeit der Infrastruktur und andererseits deren Nutzen für spätere private Nachfrager möglichst hoch sein.

Der Aufbau einer HRS-Infrastruktur für Flottenfahrzeuge wurde deshalb mittels Modellierung und Simulation untersucht. Betrachtungsgebiet für den Aufbau von HRS waren die zwölf bevölkerungsreichsten Städte der neuen Bundesländer. Die wesentlichen Projektarbeiten und -ergebnisse werden in diesem Kapitel gegliedert nach Themenfeld vorgestellt. Zunächst werden die untersuchten Flottentypen (Busse, Taxis, Carsharing-Fahrzeuge) hinsichtlich ihres Potentials im Betrachtungsgebiet sowie ihres zeitlich aufgelösten Nachfrageverhaltens betrachtet. Im zweiten Teil wird die Auslegung von HRS mit Onsite-Elektrolyse für verschiedene Kombinationen aus Flottentypen behandelt, während im dritten Abschnitt die HRS-Netzwerkgestaltung und -Evaluation vorgestellt wird. Diese drei Teile bauen in dieser Reihenfolge inhaltlich und methodisch aufeinander auf.

4.1 Nachfragepotential von Fahrzeugflotten quantifizieren

Zunächst wurde der Bestand an Bussen, Taxis und Carsharing-Fahrzeugen für die betrachteten Städte ermittelt. Diese Informationen sind wichtig für eine später folgende Abschätzung des Nachfrage- und Infrastrukturpotentials. Busbestände wurden entweder den Internetseiten oder den Geschäftsberichten der Busbetreiber entnommen. Für Taxibestände musste hingegen auf unterschiedliche Datenquellen zurückgegriffen werden. Teilweise waren Informationen auf den Internetseiten lokaler Taxivereinigungen oder -verbände verfügbar, teilweise boten Behörden die entsprechenden Informationen an. In einigen Fällen musste eine Schätzung auf Basis der Taxibestände des jeweiligen Bundeslandes und der Bevölkerungszahlen (Bundesland und jeweilige Stadt) erfolgen. Carsharing ist nicht in allen betrachteten Städten verfügbar. Es wurden nur Städte berücksichtigt, die einen Carsharing-

Fahrzeugbestand von mindestens 20 Fahrzeugen eines einzigen Anbieters aufweisen. Für alle Städte bis auf Berlin wurden die Fahrzeugzahlen des Anbieters teilAuto.de herangezogen. In Berlin waren zum Zeitpunkt der Datenerhebung über 2.000 Fahrzeuge der Anbieter DriveNow und car2go verfügbar. Eine Zusammenfassung der ermittelten Fahrzeugzahlen sind in Tabelle 1 zu finden und in Abbildung 1 grafisch dargestellt. Darüber hinaus wurden die Standorte von Busdepots in diesen Städten ermittelt.

Tabelle 1: Fahrzeugbestände

Stadt	Anzahl Stadtbusse	Anzahl Taxis	Anzahl Carsharing-Fahrzeuge
Berlin	1.400	7.897	2.230
Brandenburg (Havel)	24	58	0
Chemnitz	81	223	21
Cottbus	48	81	0
Dresden	140	465	250
Erfurt	59	103	65
Frankfurt (Oder)	29	47	0
Greifswald	16	47	0
Halle (Saale)	58	160	71
Jena	44	38	44
Leipzig	158	664	250
Magdeburg	51	146	30
Potsdam	56	130	0
Rostock	68	188	0
Schwerin	40	80	0

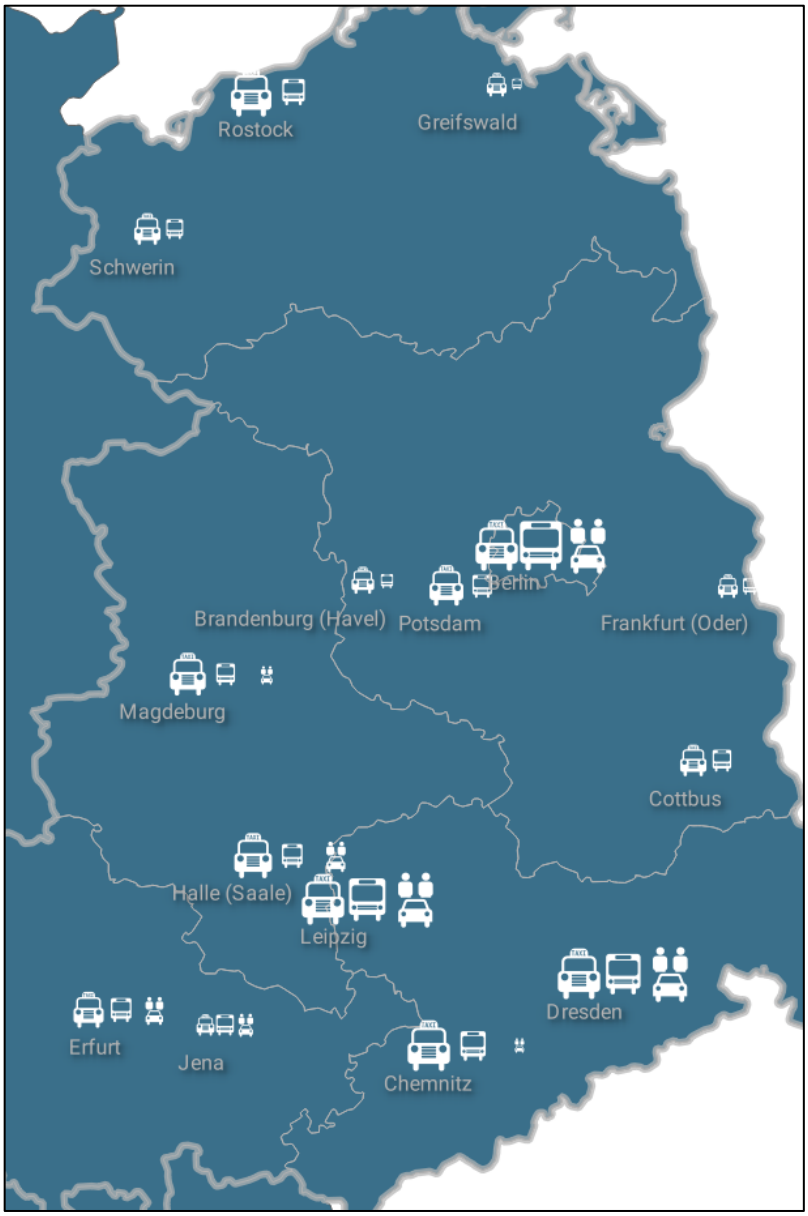


Abbildung 1: Flottenbestände (qualitativ) untersuchter Städte im Betrachtungsgebiet

Neben der Abschätzung des Potentials für Flotten war eine zeitliche sowie örtliche Auflösung der Nachfrage erforderlich. Für die zeitliche Auflösung wurde die Nachfrage für alle betrachteten Flotten- und Fahrzeugtypen modelliert. Diese Modelle werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Private Pkw

In diesem Projekt wird zwar Wasserstoffinfrastruktur für Flotten ausgelegt, dennoch sind auch private Nachfrager relevant. Denn die auszulegende Infrastruktur soll nicht nur die Flotten versorgen können, sondern auch das Tankstellennetz für private Nachfrager ergänzen. Folglich muss die Kapazität auch ausreichen, um private Nachfrager zu versorgen. Deren Tankverhalten wurde abgebildet. Es wird davon ausgegangen, dass private Nachfrage

zunächst gering sein wird. Deshalb wurde das Nachfragemodell an die Spezifikationen der H2 MOBILITY-Tankstellenklasse „Very Small“ [15] angelehnt. Diese sieht eine durchschnittliche Wasserstoffabgabe von 56 kg pro Tag bei durchschnittlich 10 Tankvorgängen und eine maximale Abgabe von 80 kg pro Tag vor. Pro Stunde liegt die Abgabe bei höchstens 18 kg Wasserstoff. Neben diesen Randbedingungen wurde das zeitliche Tankverhalten berücksichtigt. Dieses wurde angenähert über die Nutzung von Daten zweier konventioneller Tankstellen, aus denen sich die relative Tankhäufigkeit je Stunde einer Woche ableiten lässt. Zusätzlich wurden saisonale Effekte auf Basis des monatlichen Kraftstoffabsatzes berücksichtigt. Die Erzeugung des Pkw-Tanklastgangs erfolgte stochastisch unter Berücksichtigung der oben genannten Randbedingungen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen.

Carsharing-Fahrzeuge

Das Tankverhalten von Carsharing-Fahrzeugen wurde auf Basis von Daten zu Fahrzeugen der Anbieter DriveNow und car2go ermittelt. Diese Daten wurden von einem Partner ermittelt und für dieses Vorhaben zur Verfügung gestellt. Auf Basis dieser Daten wurde abgeschätzt, wie häufig die Fahrzeuge in einer Stunde der Woche getankt wurden. Dieses Tankverhalten wurde in das oben erwähnte Lastgangmodell für private Nachfrage integriert. Die mittlere getankte Wasserstoffmasse wurde auf Basis von angenäherten Jahresfahrstrecken angenommen. Auf diese Weise wurden Lastgänge für verschiedene Flottengrößen von Carsharing-Fahrzeugen erzeugt.

Taxis

Aus einer Veröffentlichung („Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit des Taxigewerbes in der Bundeshauptstadt Berlin“ [16]) aus dem Juni 2016 wurden Informationen zu Fahrthäufigkeiten und -zeiten von Taxis gewonnen. Aus dieser Quelle wurden mittlere jährliche Fahrtstrecken sowie relative Fahrthäufigkeiten je Wochentag und in zweistündiger Auflösung für einen Tag entnommen. Für ausgewählte Zeitabschnitte einer Woche gibt die Quelle explizit Fahrthäufigkeiten an. Mit Hilfe dieser Informationen wurde ein Optimierungsmodell aufgebaut, das die relativen Fahrthäufigkeiten jedes Zwei-Stunden-Blocks einer Woche so bestimmt, dass die angegebenen kumulierten Häufigkeiten je Wochentag und Zwei-Stunden-Block erreicht werden. Es wurde angenommen, dass relative Tankhäufigkeiten proportional zu Fahrthäufigkeiten sind, der streckenbezogene Wasserstoffverbrauch von Taxis 1 kg/100 km beträgt und je Tankvorgang durchschnittlich 4,5 kg Wasserstoff getankt werden. Diese Daten wurden in das oben genannte Modell überführt, das mit stochastischen Methoden einen Tanklastgang für ein Jahr erzeugt. Derartige Tanklastgänge wurden für verschiedene Flottengrößen von Taxis generiert.

Busse

Für die Berücksichtigung von Bussen als Wasserstoffnachfrager wurden Informationen eines Tages zu Fahrtstrecken, -dauern und Ein- bzw. Ausfahrtzeiten aus dem Depot von Bussen

einer Stadt mit 170.000 Einwohnern verwendet. Der durchschnittliche Wasserstoffverbrauch von Bussen wurde aus dem Projekt „CHIC“ entnommen und beträgt 12,1 kg/100 km [17]. Daraus konnten Tanklastgänge für 1 bis 10 Busse abgeleitet werden. Diesen liegt die Annahme zugrunde, dass zunächst die 18 m-Busse mit langen Fahrtstrecken durch Wasserstoffbusse ersetzt werden. Zudem wurde davon ausgegangen, dass die Tagesfahrleistung am Wochenende nur halb so groß wie an Werktagen ist. Es wurde eine Handhabungsdauer beim Tankvorgang von 10 Minuten angenommen.

Die räumliche Verteilung der Nachfrage erfolgte je nach Flottentyp anhand unterschiedlicher Kriterien. Für Carsharing-Fahrzeuge orientiert sich die Verortung der Nachfrage an der Bevölkerungsverteilung im jeweiligen Landkreis / der jeweiligen kreisfreien Stadt, während für Taxis die Position der Taxistände in der jeweiligen Stadt herangezogen wird. Die Busnachfrage konzentriert sich nach den hier getroffenen Annahmen auf das Busdepot, das den geringsten Abstand zu einer HRS aufweist.

4.2 HRS-Auslegung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Eine diesem Projekt zugrundeliegende These besagt, dass Wasserstoff-Flottenfahrzeuge eine garantierte und regelmäßige Nachfrage nach Wasserstoff als Kraftstoff erzeugen und so HRS besser ausgelastet werden. In diesem Projekt sollte untersucht werden, in welchem Maße dadurch die Wirtschaftlichkeit eines HRS-Betriebs verbessert werden kann. Dazu wurden exemplarisch die drei Flottentypen – Busse, Taxis und Carsharing-Fahrzeuge – untersucht. Für das Nachfrageprofil dieser Flottentypen und Kombinationen dieser sollte die Wirtschaftlichkeit korrespondierender HRS bestimmt werden. Da je nach Flottentyp und -größe unterschiedlich dimensionierte HRS-Komponenten erforderlich sind, kann die Wirtschaftlichkeit nur bei einer entsprechenden Auslegung der HRS bestimmt werden.

In Kapitel 4.2.1 wird daher die entwickelte und angewendete Methodik zur Auslegung von HRS beschrieben, während in Kapitel 4.2.2 die Ergebnisse im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit gezeigt und diskutiert werden.

4.2.1 Methodik: HRS-Auslegung

Für verschiedene Kombinationen an Flottenfahrzeugen sollen HRS nach Wirtschaftlichkeitskriterien ausgelegt werden. Dafür wurde zunächst ein vollständiges Simulationsmodell einer HRS aufgebaut. Dieses umfasst die Komponenten Elektrolyseur, Niederdruckspeicher, Wasserstoffverdichter, Mitteldruck- und Hochdruckspeicher sowie den Dispenser samt Vorkühlung (siehe Abbildung 2).

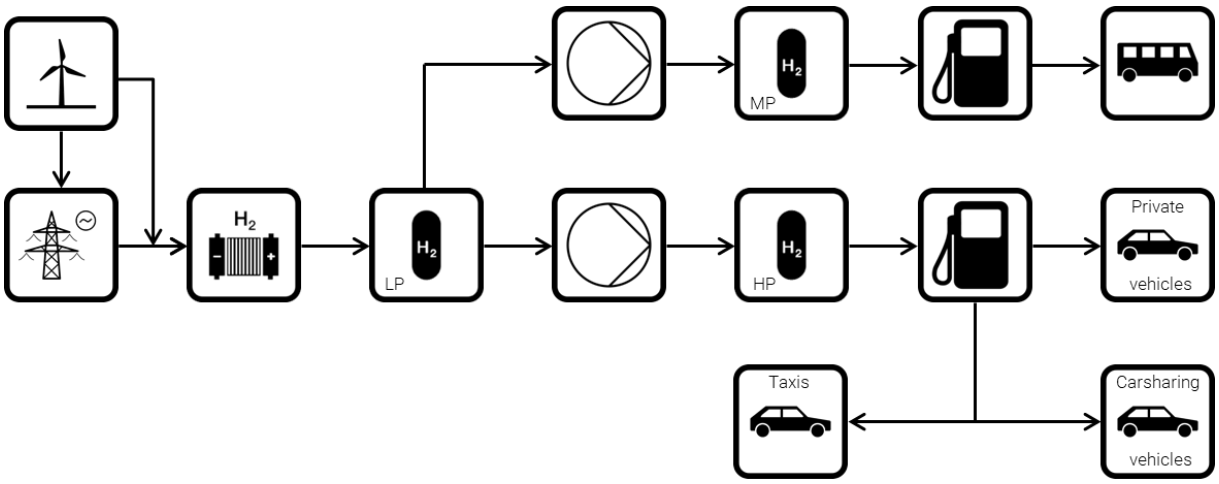


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Simulationsmodells einer HRS für Busse, Pkw und Pkw-Flotten

Die Strombezugsmöglichkeiten Intraday-Spotmarkt sowie Windenergieanlagenanbindung wurden modelliert. Für diese Arbeiten wurde auf bestehende Vorarbeiten und Modelle zurückgegriffen und diese wurden in ein übergeordnetes Framework eingebaut und angepasst. Die Komponentenkosten wurden auf Basis einer Literaturrecherche angenommen und sind im Folgenden gezeigt:

Tabelle 2: Kostenannahmen

Komponente	CAPEX	$OPEX_{fix}$	Lebensdauer	Quelle
Elektrolyseur, P: Leistung in kW	3.013 € * $(P/kW)^{0,885}$	60 €/(kW*a)	20 a	[18] [19] [20]
Speicher (50 bar)	632 €/kg	6 €/(kg*a)	30 a	[21]
Speicher (1.000 bar)	1.144 €/kg	11 €/(kg*a)	20 a	[22] [23] [24]
Verdichter	394.398 €	19.720 €/a	20 a	[24] [25] [26]
Dispenser	107.000 €	5.350 €/a	20 a	[24] [25]
Vorkühlung	140.000 €	7.000 €/a	20 a	[24] [27]
Windenergieanlage (WEA)	1,547 €/kW	56 €/(kW*a)	20 a	[28]
Planung, Vorbereitung, Genehmigung, Aufbau	40 % der HRS-CAPEX (ohne WEA)			[29]

<u>Windenergieanlage (WEA)</u>

Die gewählten Annahmen wurden aus der Literatur entnommen und beziehen sich auf eine Onshore-WEA mit einer Nennleistung zwischen 2 MW und 3 MW bei einer Nabenhöhe zwischen 100 m und 120 m.

Alkalischer Elektrolyseur:
Es wurde eine Kostenfunktion in Abhängigkeit der elektrischen Nennleistung aufgestellt. Diese basiert auf der Auswertung verschiedener wissenschaftlicher Veröffentlichungen. Die jeweiligen Angaben wurden mit Wechselkursen und Inflationsraten korrigiert und so auf das Jahr 2016 bezogen. Daten mit stark abweichenden Kosten wurden zuvor ausgeschlossen.

Wasserstoffspeicher
Es wurde eine Kostenfunktion in Abhängigkeit des Speicherdrucks aufgestellt. Diese gibt Kosten bezogen auf die Speicherkapazität in kg Wasserstoff an. Dafür wurden verschiedene Literaturquellen herangezogen und mit Wechselkursen und Inflationsraten korrigiert. Daten mit stark abweichenden Kosten wurden zuvor ausgeschlossen.

Wasserstoffverdichter
Zur Ermittlung von Kostenannahmen wurden zahlreiche Quellen ausgewertet und Gespräche mit Experten geführt. Es ergab sich ein inhomogenes Bild, da in verschiedenen Projekten unterschiedliche Technologien eingesetzt wurden. Zusätzlich geben nur wenige Quellen Aufschluss über die Leistungsfähigkeit des bewerteten Verdichters. Deshalb wurde für dieses Projekt auf eine Quelle zurückgegriffen, die dem Verdichter einen maximalen Massenstrom Wasserstoff zuordnet und deren Kostenangaben in Anbetracht der übrigen Quellen plausibel erscheinen. Die Kostenangaben wurden mit Wechselkursen und Inflationsraten korrigiert.

Dispenser
Die Kostenangaben zu Dispensern schwanken ebenfalls stark. Teilweise werden Dispenserkosten in der Literatur auf Anlagen bezogen, die bereits eine Vorkühlung enthalten. Die für dieses Projekt gewählte Kostenannahme stellt einen mittleren Wert einer Quelle dar, die eine Kostenspanne für Dispenser ohne Kühlung angibt. Diese Kostenangaben wurden mit Wechselkursen und Inflationsraten korrigiert.

Vorkühlung
Die Kosten der Vorkühlung wurden von mehreren Quellen nahezu übereinstimmend (nach Inflations- und Wechselkurskorrektur) angegeben und für dieses Projekt übernommen.

Planung, Vorbereitung, Genehmigung, Aufbau
Diese Kostenkomponenten werden in der Literatur häufig relativ zu den Beschaffungskosten der technischen Komponenten (siehe Tabelle 2) angegeben. Daher wurde auch für dieses Projekt ein Faktor gewählt.

Das Modell berücksichtigt vier verschiedene Nachfragetypen, deren Verhalten zuvor modelliert wurde (siehe Kapitel 0). Als Datengrundlage für die Spotmarktteilnahme dienen Intraday-Preise

des Jahres 2015, skaliert auf den Mittelwert der Preise der Monate Januar 2017 bis Juni 2017. In den betrachteten Szenarien wird vorgesehen, dass Energie je nach Möglichkeit und Bedarf von der WEA und vom Spotmarkt bezogen wird. Von der WEA bereitgestellte Energie, die nicht vom Elektrolyseur genutzt werden kann (z.B., weil die Speicher vollständig gefüllt sind und keine Wasserstoffnachfrage besteht), kann am Spotmarkt zum aktuell gültigen Preis verkauft werden (keine EEG-Vergütung). Sollte Strom dringend benötigt werden, die WEA jedoch keine Energie liefern können, kann Strom am Spotmarkt beschafft werden. Die 2018 gültigen Abgaben und Umlagen auf Strom wurden für diese Fälle berücksichtigt (Annahme: WEA steht in räumlicher Nähe zur Tankstelle und ist per Direktleitung verbunden).

Dieses Modell ermöglicht eine zeitlich aufgelöste Simulation (gewählte Schrittweite: eine Stunde) des Tankstellenbetriebs für eine gegebene HRS-Topologie und gibt als Ergebnis die Wasserstoffgestehungskosten (Levelized Cost of Hydrogen – LCOH2) aus. Diese basieren auf der Annuitätenmethode, die neben den genannten CAPEX und $OPEX_{fix}$ die sich aus dem simulierten Betrieb ergebenden variablen Betriebskosten ($OPEX_{var}$) zugrunde legen. Aus den LCOH2, einem angenommenen Wasserstoffverkaufspreis von 7,98 € (netto) sowie der abgesetzten Wasserstoffmasse lässt sich die Wirtschaftlichkeit von Aufbau und Betrieb der HRS bestimmen [1]. Zur Auslegung einer HRS für verschiedene Nachfragekombinationen wird ein evolutionärer Optimierungsalgorithmus mit dem Optimierungsziel einer möglichst guten Wirtschaftlichkeit eingesetzt. Dieser variiert in mehreren Schritten die Dimensionierungseigenschaften der HRS-Komponenten (z.B. Leistung des Elektrolyseurs oder Kapazität eines Wasserstoffspeichers) und evaluiert die entstehende HRS-Topologie mithilfe des oben beschriebenen Simulationsmodells. Die Variation erfolgt gezielt auf Basis der jeweiligen Evaluationsergebnisse und dauert so lange an, bis keine oder nur noch eine geringe Verbesserung der Wirtschaftlichkeit erreicht werden kann. Das entstehende Ergebnis wird als ausreichend gute Annäherung an das Optimum angesehen. Dabei galt die Randbedingung, dass die HRS jeweils so ausgelegt werden muss, dass sie die jeweiligen Flottenfahrzeuge versorgen können muss und darüber hinaus genug Kapazität aufweisen muss, um zukünftig auch private Pkw (Nachfrage entsprechend HRS-Typ ‚Very Small') versorgen zu können. Im Hinblick auf den erzielbaren Absatz von Wasserstoff wird jedoch davon ausgegangen, dass keine privaten Pkw vorhanden sind.

Diese Optimierung wurde für Flottenkombinationen bestehend aus 0, 10, 20 50, 100 und 200 Carsharing-Fahrzeugen, 0, 10, 20, 50 und 100 Taxis sowie 0, 1, 2, 5 und 10 Busse durchgeführt. Insgesamt waren also 150 Optimierungen erforderlich, die jeweils sowohl die ideale Topologie der HRS für die jeweilige Flottenkombination sowie die korrespondierende Wirtschaftlichkeit der HRS liefern.

4.2.2 Ergebnisse: Wirtschaftlichkeit von HRS für Flotten

Die Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit von HRS werden für die Kombination von je zwei Flottentypen gezeigt. Der Fall ohne Flotten kann als Referenz angesehen werden und bedeutet,

dass die HRS so ausgelegt wird, dass sie eine Pkw-Nachfrage gemäß HRS-Klasse ‚Very Small' bedienen können muss. Allerdings wird davon ausgegangen, dass wegen der gegenwärtig sehr geringen Anzahl an FCEV keine Nachfrage besteht. Die Auslastung der HRS ist folglich null und die Wirtschaftlichkeit ist unabhängig von variablen Betriebskosten.

Abbildung 3 zeigt die Wirtschaftlichkeit von HRS zur Versorgung von Carsharing-Pkw und Taxis (links) sowie für Taxis und Busse (rechts). Es ist zu erkennen, dass unter den getroffenen Annahmen in keinem der Fälle die Wirtschaftlichkeit erreicht wird, sondern in jedem Fall ein Verlust entsteht. Im Referenzfall ohne Flotten beträgt der Verlust der HRS-Betreiber 165.000 €/a. Flottenkombinationen, die zu einer besseren ökonomischen Analyse, also geringeren Verlusten, führen, sind abweichend eingefärbt (grün). Diese Verbesserung der Wirtschaftlichkeit ist auf eine durch die Flotten bedingte, verbesserte Auslastung zurückzuführen. Besonders vorteilhaft ist der Einsatz von Carsharing-Fahrzeugen. Die geringsten jährlichen Verluste der HRS-Betreiber betragen 152.000 € für eine Flotte von 60 Carsharing-Fahrzeugen. Während auch Flotten mit Taxis eine Verbesserung bewirken können, gelingt dies bei Flotten mit Bussen nicht. Insgesamt kann festgestellt werden, dass sich die Wirtschaftlichkeit bei größer werdenden Flotten wieder verschlechtert. Dies kann damit erklärt werden, dass die LCOH2 in keinem der betrachteten Fälle den Verkaufspreis von Wasserstoff erreichen kann. Der Verkauf von Wasserstoff ist unter den getroffenen Annahmen also mit einem Verlust behaftet. Ein Effekt ist folglich, dass mit steigender abgesetzter Wasserstoffmasse auch die Verluste steigen. Dieser Effekt ist bei großen Flotten dominant, während im Falle kleiner Flotten die Auswirkung einer Erhöhung der Auslastung entscheidend ist. Da schon ein Bus verglichen mit den Pkw-Nachfragern sehr viel Kraftstoff nachfragt, kann auch für die kleinste untersuchte Busflotte kein positives Ergebnis erzielt werden.

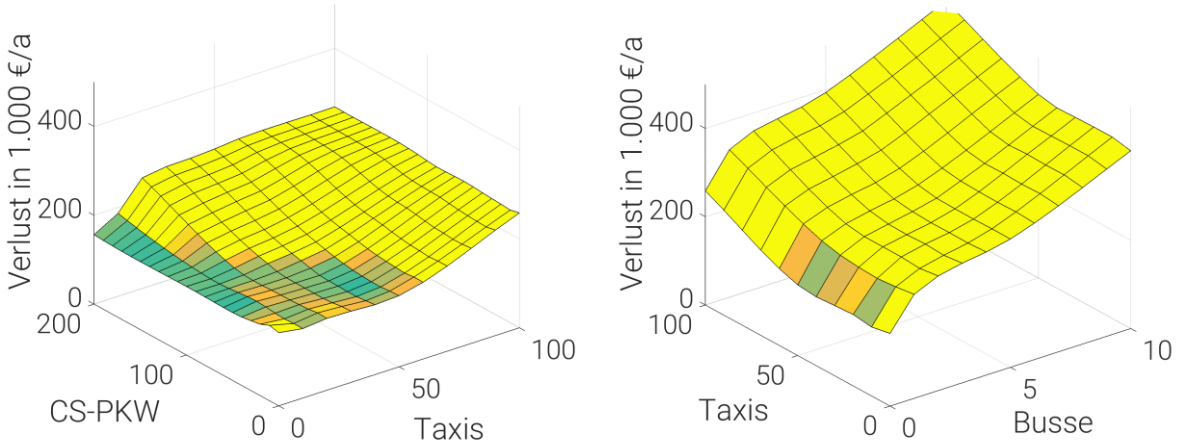


Abbildung 3: Wirtschaftlichkeit von HRS zur Versorgung von Carsharing-Pkw und Taxis (links) bzw. von Taxis und Bussen (rechts)

Die gezeigten Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit sind gültig für die getroffenen Annahmen. Variiert man beispielsweise den Verkaufspreis von Wasserstoff, so können die Ergebnisse nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ unterschiedlich ausfallen. Abbildung 4 stellt die

Wirtschaftlichkeit des HRS-Betriebs dar, wenn der Netto-Verkaufspreis von Wasserstoff auf 11,00 €/kg (links) bzw. 10,50 €/kg (rechts) angehoben wird. In diesem Fall erreichen einige Flottenkombinationen die Wirtschaftlichkeit. So kann beispielsweise eine HRS zur Versorgung von 150 Carsharing-Pkw und 100 Taxis wirtschaftlich betrieben werden. Busflotten können bereits bei einem Verkaufspreis von 10,50 €/kg zu einem wirtschaftlichen HRS-Betrieb führen (10 Busse und 50 Taxis).

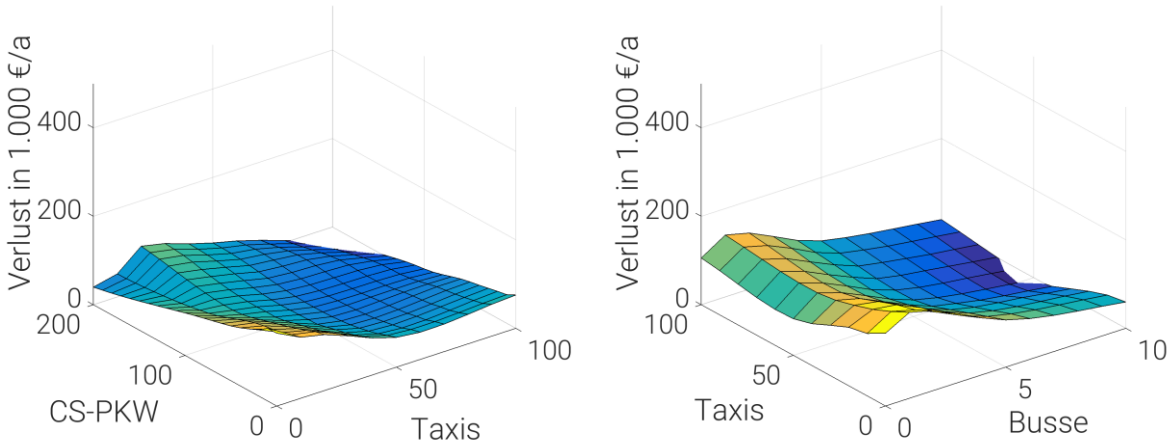


Abbildung 4: Wirtschaftlichkeit von HRS zur Versorgung von Carsharing-Pkw und Taxis bei einem H2-Preis von 11,00 €/kg (links) bzw. von Taxis und Bussen bei einem H2-Preis von 10,50 €/ kg (rechts)

Zum gegenwärtigen Verkaufspreis besteht somit ein Unterschied von etwa 2,50 €/kg. Dieser Unterschied kann entweder durch eine Erhöhung des Verkaufspreises oder durch eine entsprechende Senkung der LCOH2 erreicht werden.

4.3 HRS-Netzwerkauslegung

Es wurde gezeigt, dass der Einsatz von Flottenfahrzeugen mit Brennstoffzelle die Wirtschaftlichkeit von HRS verbessern kann (siehe Kapitel 4.2). Derartige Fahrzeuge erhöhen durch ihre regelmäßig auftretende Nachfrage nach Wasserstoff als Kraftstoff die Auslastung von HRS, während gleichzeitig die Anforderungen an die räumliche Verteilung von Infrastruktur begrenzt sind. Brennstoffzellen-Flottenfahrzeuge und die sie versorgenden HRS können folglich „Wasserstoff-Inseln“ bilden. Die zentrale Forschungsfrage dieses Projekts ist, ob durch den Aufbau und die gezielte Positionierung mehrerer solcher „Wasserstoff-Inseln“ das übergeordnete HRS-Netzwerk so ergänzt werden kann, dass es den Anforderungen privater Pkw-Betreiber bestmöglich genügt. Insbesondere sollten ein solches HRS-Netzwerk ausgelegt und geeignete Orte eines kombinierten Flotten- und HRS-Einsatzes bestimmt werden.

Dazu wurde in einem ersten Schritt eine Methodik zur Bewertung des Netzwerknutzens entwickelt (siehe Kapitel 4.3.1). Darauf aufbauend wurde eine Methodik zur HRS-Netzwerkauslegung entworfen und umgesetzt (siehe Kapitel 4.3.2). Diese Methoden wurden auf zwei Szenarien (siehe Kapitel 4.3.3) für die neuen Bundesländer angewendet. Die Ergebnisse werden in Kapitel 4.3.4 dargestellt.

4.3.1 Methodik: Bewertung des Netzwerknutzens

Für die Quantifizierung des Nutzens eines Tankstellennetzwerks für private Pkw-Fahrer existiert kein etabliertes Maß. Die in diesem Projekt entworfene Methodik wird im Folgenden beschrieben.

Ein Problem eines anfänglich „dünnen" Tankstellennetzwerks besteht darin, dass Fahrzeuge nicht so genutzt werden können wie konventionelle Fahrzeuge, die auf ein Netzwerk von etwa 14.000 konventionellen Tankstellen zurückgreifen. Deshalb wird in diesem Projekt als Maß für den Netzwerknutzen die Anzahl an Personen gewählt, die ohne größere Einschränkungen ein FCEV für ihre Fahrten nutzen können. Folglich müssen Annahmen getroffen werden, unter welchen Voraussetzungen davon ausgegangen werden kann, dass ein FCEV ohne größere Einschränkungen benutzt werden kann.

Auf Basis einer Literaturrecherche zum Tankverhalten von Pkw-Fahrern wird als eine von zwei Anforderungen definiert, dass mindestens eine HRS in höchstens zehn Fahrminuten Entfernung vom Wohnort gelegen sein muss. Diese Tankstelle soll für alltägliche Fahrten in der eigenen Stadt genügen. Tatsächlich ist es aber erforderlich, auch darüberhinausgehende Mobilität in andere Städte und Regionen Deutschlands zu ermöglichen. Deshalb wird als zweites Kriterium definiert, dass mindestens 75 % der Fernfahrten möglich sein müssen. Als Fernfahrt gilt dabei jede Fahrt, die alleine mit der „Zuhause"-Tankstelle nicht möglich wäre. Das bedeutet, dass alle Fahrten für dieses Kriterium relevant sind, deren Länge die halbe Fahrzeugreichweite übersteigt.

Um die Güte eines HRS-Netzwerks zu bestimmen, wird also ermittelt, für wie viele Personen gilt, dass

1) mindestens eine der HRS in der Nähe des Wohnorts liegt (maximal 10 Fahrminuten entfernt) und
2) 75 % der Fernfahrten möglich sind.

Um diese beiden Kriterien quantifizieren zu können, sind folgende Daten nötig:

<u>Räumlich aufgelöste Bevölkerungsverteilung</u>:
Es werden Zensusdaten in einer Auflösung von 100 m mal 100 m verwendet [30].

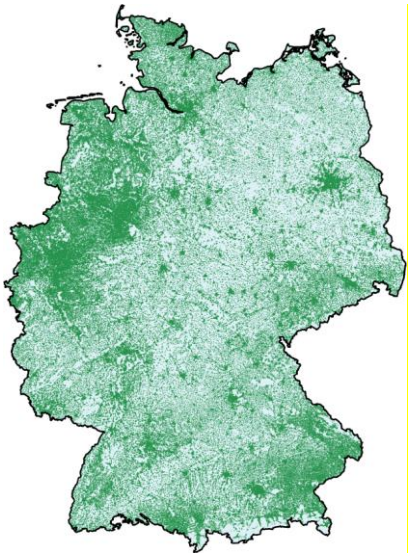


Abbildung 5: Bevölkerungsverteilung [31], [30]

Verkehrsdaten

Es werden Daten der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 verwendet [32]. Diese Daten beinhalten einerseits eine Prognose für das Jahr 2030 und Daten basierend auf Erhebungen aus dem Jahr 2010. Es werden letztere genutzt. Die räumliche Auflösung der Daten entspricht der Landkreisebene. Das heißt, es ist für jeden Landkreis bekannt, wie viele Fahrten mit Pkw innerhalb eines Jahres von dem jeweiligen Landkreis in jeden anderen Landkreis unternommen werden.

Routenverläufe

Die Anzahl der Fahrten zwischen zwei Landkreisen allein genügt nicht, da die Fahrten nicht auf der Luftlinie, sondern entlang des Straßennetzes erfolgt. Deshalb wird für jede Kombination aus zwei Landkreisen (~ 170.000 Kombinationen) ein Routing entlang des deutschen Straßennetzes [31] durchgeführt. Start- und Endpunkt einer Fahrt sind dabei die bevölkerungsgewichteten Flächenschwerpunkte der Landkreise. Abbildung 6 zeigt beispielhaft die identifizierte Verbindung von Berlin und Saarbrücken sowie das zugrundeliegende Fernstraßennetz.

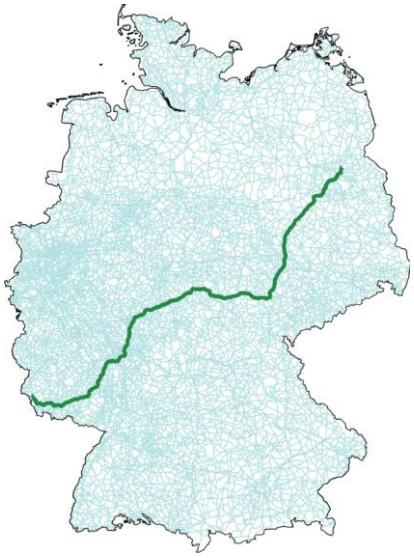


Abbildung 6: Realistische Routenverläufe entlang des Straßennetzes (Bsp. Berlin - Saarbrücken) [31]

Für ein gegebenes HRS-Netzwerk wird ermittelt, wie viele Personen im Einzugsgebiet einer HRS leben. Diese Zahl alleine ist jedoch ohne Bedeutung, da beide o.g. Kriterien zur Nähe zum Wohnort und den machbaren Fernfahrten gleichzeitig erfüllt sein müssen. Zur Quantifizierung des zweiten Kriteriums wird für jeden Landkreis ermittelt, welche anderen Landkreise man mit einem FCEV erreichen kann. Dazu wird die zuvor bestimmte Route zwischen den jeweiligen Landkreisen herangezogen und geprüft, welche HRS ausreichend nah – gemäß einer definierten Umwegtoleranz – an der Route liegen. Es wird dann simuliert, ob eine Fahrt mit einem FCEV mit gegebener Reichweite zum Ziellandkreis und zurück zum Ursprung möglich ist. Aus den Daten der Verkehrsverflechtungsprognose ist bekannt, welchen Anteil Fahrten vom Ursprungs- zum Ziellandkreis an der Gesamtzahl an Fahrten vom Ursprungslandkreis in andere Landkreise ausmachen. Es wird dann bestimmt, ob der Anteil der möglichen Fahrten den Schwellenwert von 75 % übersteigt. Nur in diesem Fall werden alle Personen dieses Landkreises, die im Einzugsgebiet einer HRS leben für die Quantifizierung des Netzwerknutzens gezählt.

4.3.2 Methodik: HRS-Netzwerkauslegung

Zur Auslegung eines HRS-Netzwerks wird ein Optimierungsverfahren eingesetzt. Dieses führt in drei Stufen eine Tankstellenpositionierung durch. Dabei spielen die Anforderungen von Flottenfahrzeugen an die Infrastruktur sowie die Versorgung von Fernstraßen mit HRS eine Rolle. Im Folgenden wird deshalb zunächst auf diese beiden Aspekte eingegangen, bevor anschließend die drei Optimierungsschritte erklärt werden.

<u>Flottenanforderungen an HRS-Infrastruktur</u>

Obwohl die untersuchten Flottentypen (Bus, Taxi, Carsharing) nur lokale Infrastruktur benötigen, kann es sein, dass eine HRS in der jeweiligen Stadt nicht ausreichend ist. Deshalb werden je nach Flottentyp Anforderungen an die HRS-IInfrastruktur formuliert, die erfüllt sein

müssen, damit der jeweilige Flottentyp in einer Stadt eingesetzt werden kann. In diesem Projekt wird die Annahme getroffen, dass für den Einsatz von FCEV-Bussen eine HRS genügt, wenn sie von einem Busdepot aus in einer definierten Fahrtdauer erreicht werden kann. Darüber hinaus wird angenommen, dass für den Betrieb von FCEV-Taxis so viele HRS in einer Stadt vorhanden sein müssen, dass ein definierter Anteil der Taxistände eine HRS in vorgegebener Fahrtdauer erreichen kann. Der Einsatz von Wasserstoff-Carsharingfahrzeugen ist gemäß den Annahmen dann möglich, wenn ein Mindestanteil der Bevölkerung im Stadtgebiet eine HRS in vorgegebener Fahrtdauer erreichen kann. Diese Anforderungen der Flottentypen an die HRS-Infrastruktur fließen in den ersten Schritt der HRS-Positionierung ein, sodass nur HRS-Netzwerke als Ergebnis ausgegeben wurden, die den jeweiligen Anforderungen genügen.

Fernstraßenanschlusserfordernisse

Zur Auslegung eines HRS-Netzwerks genügt es nicht, nur ideale Standorte in einzelnen Städten zu finden. Es ist außerdem entscheidend, Fahrten entlang eines Fernstraßennetzwerks zu ermöglichen. Dazu müssen HRS in der Nähe solcher Routen positioniert werden. Allerdings ist nicht vorab bekannt, welche Straßen versorgt werden sollten und an welchen eine HRS nur einen geringen Nutzen hat. Deshalb werden im Optimierungsverfahren zunächst je Stadt alle Möglichkeiten einer Positionierung von HRS an Fernstraßen betrachtet und erst später aus diesen Möglichkeiten die jeweils besten Varianten ausgewählt. Diese verschiedenen Möglichkeiten, Fernstraßen mit HRS zu versorgen werden im Folgenden als Fernstraßen-anschlusserfordernis bezeichnet. Sie stellen eine Randbedingung der optimierten Positionierung von HRS dar. Beispielsweise könnte in einer Stadt mit drei Fernstraßen das Erfordernis formuliert werden, die erste, die zweite oder die dritte Fernstraße mit HRS zu versorgen sowie jede Kombination daraus. Entsprechend gibt es in diesem Beispiel acht denkbare Fernstraßen-anschlusserfordernisse.

HRS-Positionierung: Erster Schritt

Es werden zunächst einzelne Städte unabhängig voneinander betrachtet. Dort werden für viele verschiedene Fälle ideale HRS-Positionen gefunden. Die Fälle unterscheiden sich hinsichtlich Flottengrößen, Anzahl der zu positionierenden HRS und Fernstraßenanschlusserfordernissen. Je Stadt ergeben sich so mehrere Tausend Kombinationen, für die jeweils eine Optimierung durchgeführt wird. Optimierungskriterium ist die Anzahl der Personen, die im Einzugsgebiet einer HRS leben. Das Einzugsgebiet ist definiert über eine maximale Fahrtdauer bis zur jeweiligen HRS.

HRS-Positionierung: Zweiter Schritt

Im zweiten Schritt findet eine Eingrenzung der Varianten statt, indem mittels Optimierung eine Auswahl an Flottenkombinationen getroffen und eine Anzahl an HRS gewählt wird. Dies wird ebenfalls separat für jede betrachtete Stadt durchgeführt. Es handelt sich um eine

Mehrzieloptimierung mit den Zielen „geringste Kosten“ und „große Anzahl an Menschen im Einzugsgebiet einer HRS“. Folglich ergibt sich je Stadt nicht nur ein Optimum, sondern es ergeben sich mehrere Optima entlang einer sogenannten Pareto-Front. Die Elemente dieser Pareto-Front stellen jeweils unterschiedlich ausgeprägte Kompromisse hinsichtlich der beiden Optimierungsziele dar. Die Auswahl von Flottenkombinationen spielt dabei eine große Rolle, da sie einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat (siehe Kapitel 4.2.2). Jedes Element der Pareto-Front ist definiert über eine Anzahl an HRS, deren Positionen sowie den Flottenfahrzeugen in einer Stadt.

HRS-Positionierung: Dritter Schritt

Im letzten Schritt werden alle Städte des Betrachtungsgebiets gemeinsam in einer Optimierung behandelt und ideale Positionen von HRS und dazu passenden Flotten-kombinationen ermittelt. Dabei wird je Stadt aus den Elementen der im zweiten Schritt ermittelten Pareto-Front eine Auslegung ausgewählt. Als Maß für die Güte des daraus entstehenden Gesamtnetzwerks wird dabei der Nutzen für private FCEV-Nutzer (siehe Kapitel 4.3.1) herangezogen. Ergebnis dieses Schritts ist ein HRS-Gesamtnetzwerk, definiert durch die Anzahl und Position von HRS in jeder der betrachteten Städte sowie den dazu passenden Flottenfahrzeugen.

4.3.3 Szenarien und Annahmen

Die entwickelten Methoden wurden auf zwei Szenarien angewendet. Im Folgenden werden sowohl die getroffenen Annahmen und Parameter sowie die Szenariendefinitionen dargestellt.

Annahmen

Für die Bewertung des Netzwerknutzens (siehe Kapitel 4.3.1) wurden die relevanten Parameter wie folgt festgelegt:

- Einzugsgebiet einer HRS: 10 Fahrminuten, entsprechend etwa 2,8 km Radius (Luftlinie).
- Geforderter Anteil möglicher Fernfahrten: 75 %.
- Umwegtoleranz entlang einer Route zur Erreichung einer HRS: 3 km (Luftlinie, einfache Entfernung).
- Fahrzeugreichweite: 333 km, entspricht einer Tankkapazität von 5 kg und einem streckenbezogenen Kraftstoffverbrauch von 1,5 kg / 100 km. Dieser vergleichsweise hohe Verbrauch wurde angenommen, da es sich um Fernfahrten entlang von Bundesstraßen und Autobahnen handelt, die zu einem erhöhten Verbrauch führen. Darüber hinaus wird so berücksichtigt, dass Fahrer mit einer Sicherheitsreserve planen und ihren Energievorrat zwischen zwei Tankstellen selten vollständig aufbrauchen.

Für die Netzwerkauslegung (siehe Kapitel 4.3.2) wurden folgende Parameter festgelegt:

- Maximale Fahrtdauer vom Busdepot zu einer HRS: 10 Minuten, entsprechend etwa 1,7 km Radius (Luftlinie).

- Anteil der „erschlossenen“ Taxistände, damit ein Taxibetrieb möglich wird: 50 %. Ein Taxistand gilt als „erschlossen“, wenn er eine HRS maximal 10 Fahrminuten, entsprechend etwa 2,8 km Radius, entfernt ist.
- Anteil der „erschlossenen“ Bevölkerung, damit ein Carsharing-Betrieb möglich wird: 50 %. Einwohner gelten als „erschlossen“, wenn sie eine HRS in maximal 10 Fahrminuten erreichen können.
- Anzahl zu positionierender HRS je Stadt: zwischen einer und acht HRS.

Szenarien

Es wurden zwei Szenarien definiert, denen gemein ist, dass HRS in allen Städten der neuen Bundesländer mit mindestens 100.000 Einwohnern und Schwerin zugebaut werden können. Insgesamt werden somit zwölf Städte betrachtet. Auch wenn zusätzliche HRS nur im Gebiet der neuen Bundesländer vorgesehen werden, wird das gesamte Bundesgebiet mit den bestehenden HRS herangezogen, um den Nutzen des entstehenden Tankstellennetzwerks zu bewerten. Der Bestand an Bussen, Taxis und Carsharing-Fahrzeugen wird individuell für jede Stadt berücksichtigt (siehe Kapitel 0). Es wird davon ausgegangen, dass maximal 50 % der bestehenden Fahrzeuge durch FCEV ersetzt werden können. Zudem können im Modell maximal 100 Taxis, 200 Carsharing-Fahrzeuge und 10 Busse durch FCEV ersetzt werden. Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich des als bestehend angenommenen HRS-Netzwerks.

Szenario 1

Für den Bestand an HRS werden alle verwendet, die in Betrieb oder in Planung sind (Anzahl Stand 2019: 75). Dies entspricht in Abbildung 7 allen eingezeichneten Kreisen (grün in Betrieb und weiß geplant). Dieses Szenario repräsentiert einen bereits fortgeschrittenen HRS-Aufbau. Die auf dieses Szenario angewendeten Methoden ergänzen dieses Netzwerk entsprechend.

Szenario 2

Abweichend zu Szenario 1 werden im Gebiet der neuen Bundesländer nur HRS als bestehend angenommen, die bereits in Betrieb sind. Insgesamt werden so 66 HRS betrachtet. Die grünen Kreise in Abbildung 7 markieren die in Szenario 2 als bestehend angenommenen HRS. Dieses Szenario repräsentiert einen weniger fortgeschrittenen HRS-Zubau.

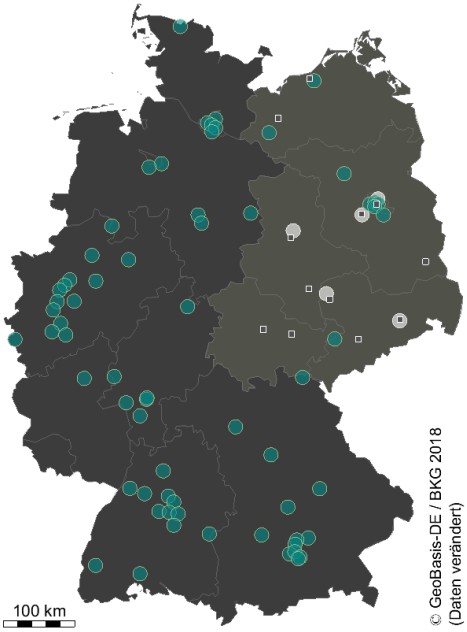


Abbildung 7: Angenommener Bestand an HRS in den Szenarien 1 (grüne und weiße Kreise) und 2 (grüne Kreise). Quadrate markieren die betrachteten Städte

4.3.4 Ergebnisse: HRS-Netzwerkauslegung

Ergebnis der Szenarienbetrachtungen sind unterschiedlichen HRS-Netzwerke, die Kosten sowie den Nutzen des Netzwerks für private Pkw-Fahrer. Die Auslegung des HRS-Netzwerks erfolgt in mehreren Schritten, weshalb im Folgenden teils beispielhaft verschiedene Zwischenergebnisse gezeigt und diskutiert werden. Dabei werden nur Ergebnisse für Szenario 1 gezeigt, weil die grundlegenden Effekte und zu diskutierenden Aspekte qualitativ für beide Szenarien gleichermaßen gelten. Zuletzt werden die ermittelten Netzwerkauslegungen und deren Eigenschaften für beide Szenarien dargestellt.

<u>Zwischenergebnisse für Szenario 1</u>

Die Netzwerkauslegung erfolgte unter Einbezug von Flottenfahrzeugen. Für die verschiedenen betrachteten Flottentypen gelten unterschiedliche Anforderungen an die Infrastruktur (siehe Kapitel 4.3.2). Diesen Anforderungen kann nicht immer mit einer HRS genügt werden, weshalb die Frage zu beantworten ist, wie viele HRS für einen Flottenbetrieb in der jeweiligen Stadt erforderlich sind. Die folgenden Abbildungen (Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10) zeigen diese jeweils erforderliche HRS-Anzahl. Auf der Abszisse ist dabei die Einwohnerzahl der Stadt und auf der Ordinate die Anzahl erforderlicher HRS eingetragen. Jede Stadt ist durch einen ausgefüllten Kreis repräsentiert. Die nicht ausgefüllten Kreise zeigen den Bestand an HRS in der jeweiligen Stadt an.

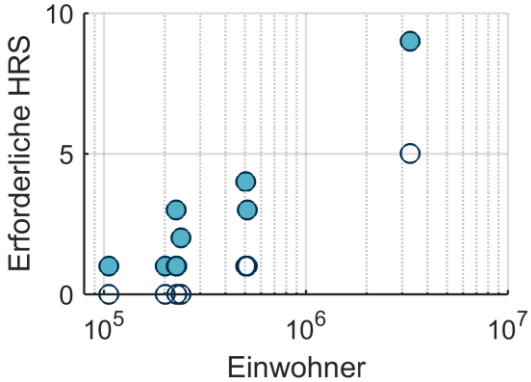


Abbildung 8: Für Carsharing erforderliche Anzahl HRS

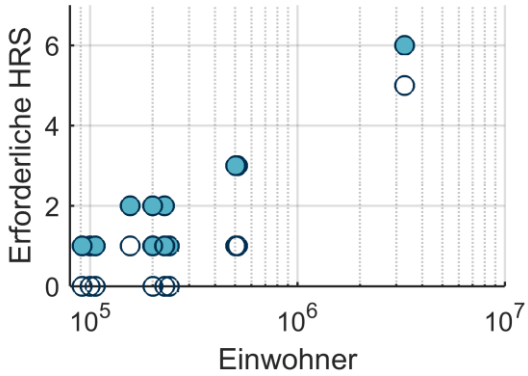


Abbildung 9: Für einen Taxibetrieb erforderliche Anzahl HRS

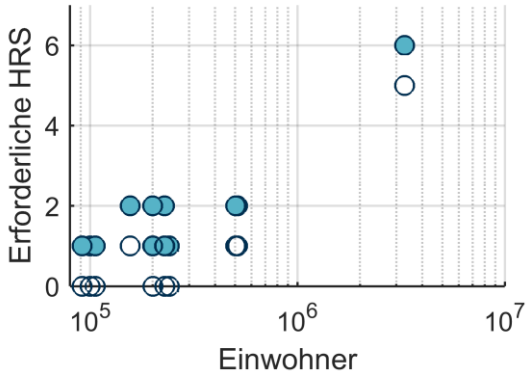


Abbildung 10: Für einen Busbetrieb erforderliche Anzahl HRS

Es kann festgestellt werden, dass größere Städte mehr HRS erfordern, um den Anforderungen von Taxis und Carsharing-Fahrzeugen zu genügen. Während dieser Zusammenhang erwartet werden konnte, ist überraschend, dass es bei ähnlich großen Städten teils auch zu Unterschieden kommt. Beispielsweise für Städte mit etwa 200.000 Einwohnern genügt für den Carsharing-Betrieb teils eine HRS, teils sind drei HRS erforderlich. Für Busse genügt zwar gemäß den Annahmen eine HRS in der Nähe eines Busdepots. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass teils deutlich mehr HRS erforderlich sind. Beispielsweise in Berlin (in den Abbildungen jeweils die Stadt mit der höchsten Einwohnerzahl) werden sechs HRS gefordert. Das liegt daran, dass bereits fünf HRS bestehen, aber keine dieser Tankstellen in der Nähe eines der

sechs Busdepots liegt. Somit muss eine weitere HRS vorgesehen werden, um den angenommenen Anforderungen eines Busbetriebs zu genügen.

Zusätzlich zur mindestens erforderlichen Anzahl an HRS stellen deren Positionen ein Ergebnis des ersten Optimierungsschritts dar. Abbildung 11 zeigt am Beispiel von Berlin neben der Bevölkerungsverteilung (oben links) die jeweils erforderlichen HRS mit ihren Positionen. Dabei wird zwischen bestehenden HRS (nicht ausgefüllte, kleine Kreise) und zusätzlich vorgesehenen HRS (blau ausgefüllte, kleine Kreise) unterschieden. Der Umkreis zeigt jeweils das Einzugsgebiet (10 Fahrminuten) an. Man kann erkennen, dass alle Flottentypen in Berlin unterschiedliche HRS-Positionen erfordern. Damit Carsharing möglich wird, müssen die bestehenden fünf HRS durch vier zusätzliche ergänzt werden. Nur so können mindestens 50 % der Bevölkerung eine HRS in höchstens 10 Fahrminuten erreichen. Für Taxis ist hingegen nur eine zusätzliche HRS erforderlich, um das Kriterium, 50 % der Taxistände zu erschließen zu erfüllen. Für Busse ist, wie oben bereits diskutiert, eine zusätzliche HRS erforderlich.

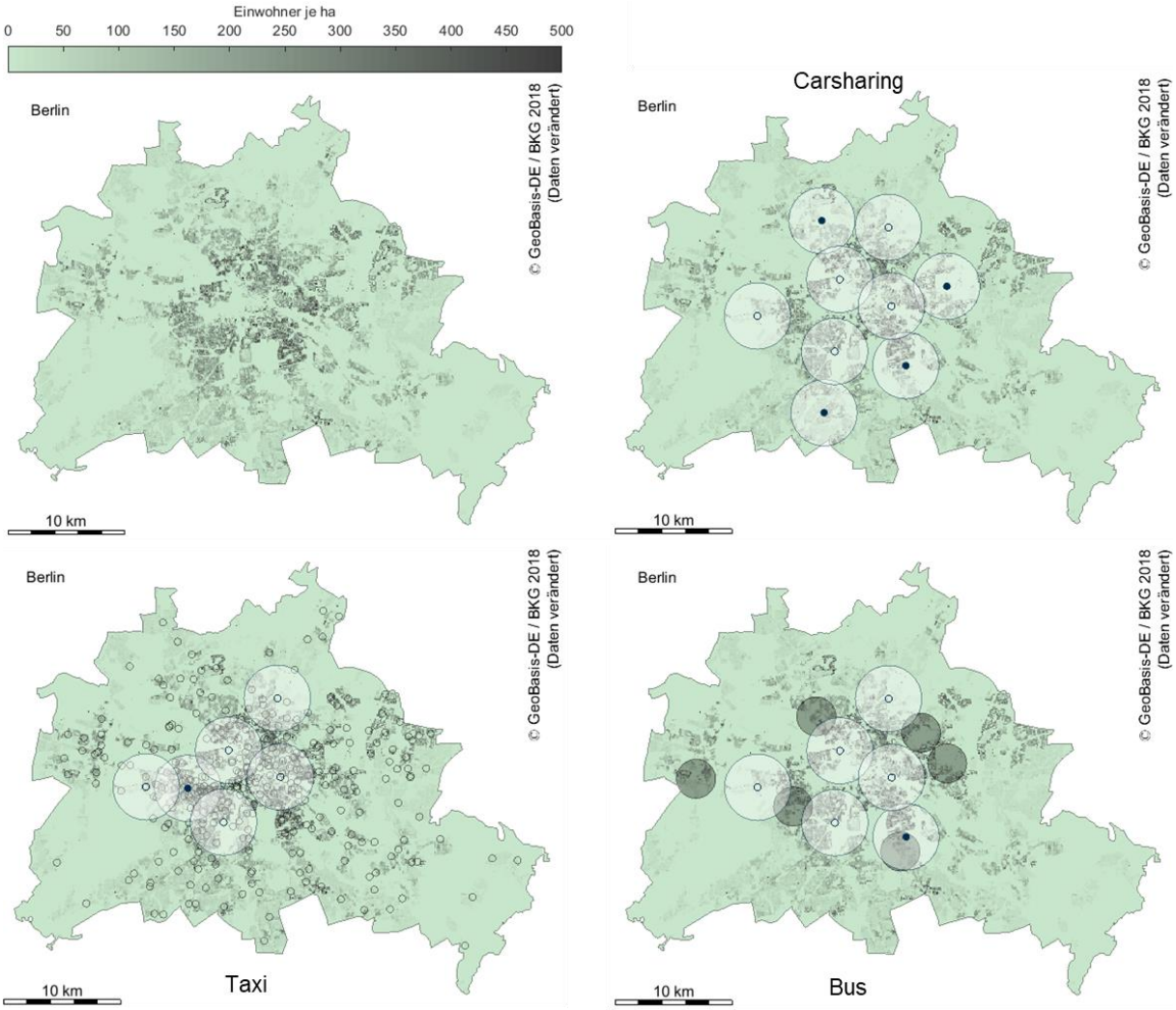


Abbildung 11: Beispiel Berlin: Einwohnerdichte (oben links) sowie Anzahl und Position von HRS für Carsharing (oben rechts), Taxi (unten links) und Bus (unten rechts). Taxistände sind als kleine graue Kreise dargestellt (©

OpenStreetMap-Mitwirkende), Busdepots als große graue Kreise. Bestehende HRS sind als nicht ausgefüllte, zusätzliche HRS als blau ausgefüllte, kleine Kreise dargestellt.

Diese Abbildungen zeigen am Beispiel von Berlin die Konfiguration der jeweils mindestens erforderlichen HRS. Die Erfüllung von Flottenanforderungen an die Infrastruktur war im ersten Optimierungsschritt nicht das Optimierungsziel, sondern eine Randbedingung. Das Optimierungsziel bestand darin, HRS so zu positionieren, dass möglichst viele Personen im Einzugsgebiet einer HRS leben. Werden mehr HRS als die mindestens erforderlichen vorgesehen, kann in der Regel auch mehr Personen der Zugang zu einer HRS ermöglicht werden. Die gezeigten Beispiele stellen deshalb nur einen kleinen Teil der in diesem Schritt erreichten Ergebnisse dar. Tatsächlich wurden je Stadt bis zu acht zusätzliche HRS positioniert – für jede denkbare Kombination an zu versorgenden Flotten und Fernstraßenanschlusserfordernissen. Für jede dieser Varianten wurden die idealen HRS-Positionen und die Anzahl der erschlossenen Personen ermittelt.

<u>Netzwerkauslegung, -kosten und -nutzen</u>

Ein Hauptergebnis der Optimierung besteht in verschieden ausgeprägten Netzwerktopologien. Es wurden zwei Optimierungsziele definiert:

1) Möglichst geringer Bezuschussungsbedarf des HRS-Netzwerks
2) Eine möglichst hohe Anzahl an Personen, denen das Netzwerk einen Umstieg auf ein Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) ermöglicht

Da unter den getroffenen Annahmen (Investitionskosten, Stromkosten und Stromnebenkosten, etc.) in keinem Fall ein wirtschaftlicher Betrieb einer HRS möglich ist, entstehen mit jeder zusätzlichen HRS Verluste für den HRS-Betreiber. Sollen diese durch Bezuschussung ausgeglichen werden, entsteht ein Bezuschussungsbedarf. Dieser soll gemäß dem ersten Optimierungsziel möglichst gering sein. Die beiden Ziele stehen gleichberechtigt nebeneinander und da beide nicht gleichzeitig vollumfänglich erfüllt werden können, entsteht nicht ein einziges Optimum, sondern eine Vielzahl an möglichen Lösungen. Diese stellen jeweils unterschiedlich ausgeprägte Kompromisse zwischen den beiden Optimierungszielen dar und bilden die sogenannte Pareto-Front.

Abbildung 12 zeigt die beiden Optimierungsziele auf der Abszisse bzw. Ordinate und die resultierende Pareto-Front. Man erkennt, dass nur mit den bestehenden und geplanten HRS (71) bereits etwa 1,2 Mio. Personen der Umstieg auf ein FCEV ermöglicht wird (Schnittpunkt der Pareto-Front mit der Abszisse). In diesem Fall ist keine weitere Bezuschussung erforderlich. Dabei muss beachtet werden, dass die zugrunde gelegten Bevölkerungsdaten alle Personen beinhalten, also auch Kinder und andere Personen ohne eigenes Fahrzeug. Diese Zahl lässt sich also nicht ohne Weiteres in eine Pkw-Anzahl übersetzen.

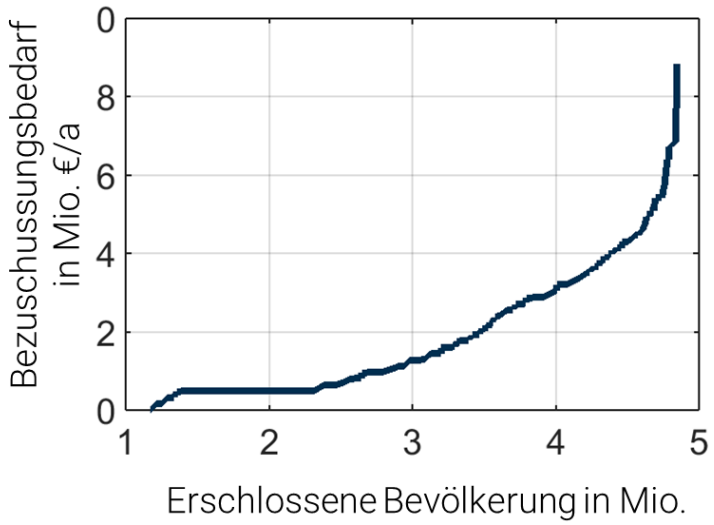


Abbildung 12: Optimierungsergebnisse

Soll nun die Anzahl der Personen erhöht werden, müssen zusätzliche HRS vorgesehen werden. Wählt man folglich einen Punkt auf der Pareto-Front weiter rechts, so ergibt sich die in Abbildung 13 gezeigte Lösung. Zusätzliche HRS sind als ausgefüllte Kreise in der Karte eingetragen, während bestehende HRS durch semi-transparente Kreise angezeigt werden. Es entsteht ein jährlicher Bezuschussungsbedarf insgesamt von etwa 0,5 Mio. € und es kann insgesamt etwa 1,3 Mio. Personen der Umstieg auf ein FCEV ermöglicht werden. Die Karte zeigt dabei, wo die zusätzlichen drei HRS vorgesehen werden (zwei Mal Rostock und Halle an der Saale). Zusätzlich sind die durch diese HRS nun ermöglichten zusätzlichen Verkehrsströme als farbige Linie eingetragen.

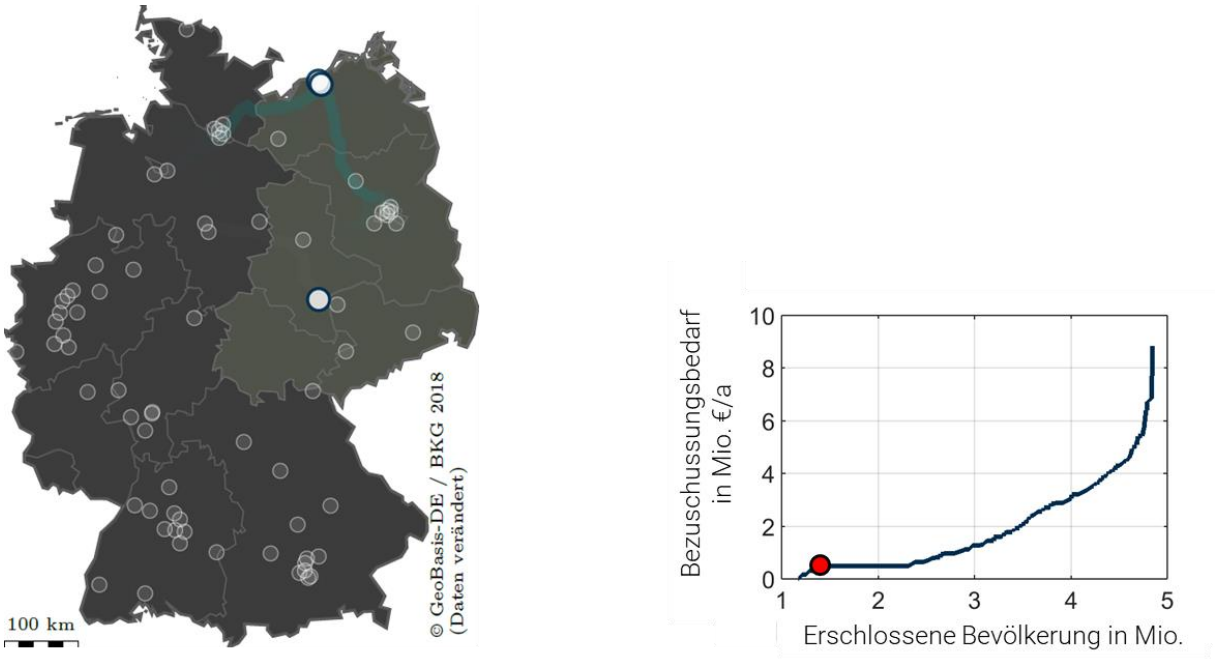
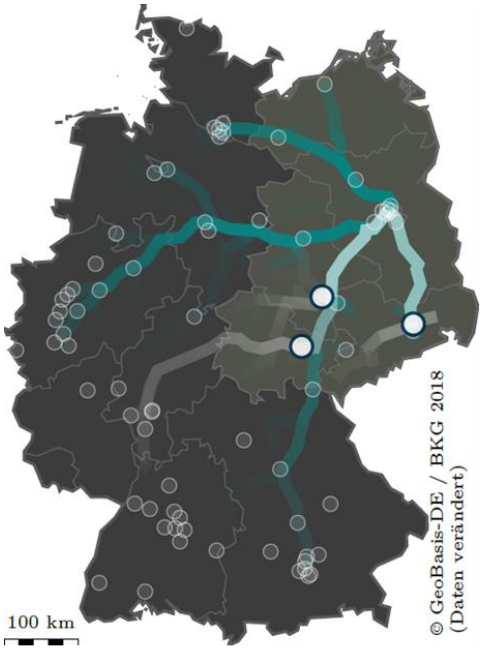


Abbildung 13: Netzwerkgestalt für ein Ergebnis mit geringem Bezuschussungsbedarf

In den folgenden Abbildungen werden weitere Punkte der Pareto-Front beispielhaft gezeigt. Abbildung 14 zeigt ein System, das ebenfalls drei HRS zusätzlich vorsieht. Die Kosten liegen ebenfalls bei etwa 0,5 Mio. €/a, der Nutzen ist jedoch signifikant höher, da etwa 2,3 Mio. Personen der Umstieg auf ein FCEV ermöglicht wird. Dies ist auch an den deutlich gestiegenen, zusätzlichen FCEV-Verkehrsströmen zu erkennen. Diese enorme Verbesserung beruht darauf, dass das HRS-Netzwerk zuvor nicht ausreichend war, um Berlinern den Umstieg auf ein FCEV zu ermöglichen. Zwar bestehen einige HRS in Berlin und für viele Menschen ist die Bedingung, in der Nähe einer HRS zu wohnen, zwar erfüllt. Jedoch konnten aus Berlin nicht mindestens 75 % der Fernfahrten absolviert werden. Durch die drei zusätzlichen HRS in Halle (Saale), Dresden und Jena wird diese Schwelle nun aber gerade überschritten. Alle Personen, die in Berlin bereits im Umkreis einer HRS wohnen, könnten (gemäß den getroffenen Annahmen) nun ein FCEV nutzen.



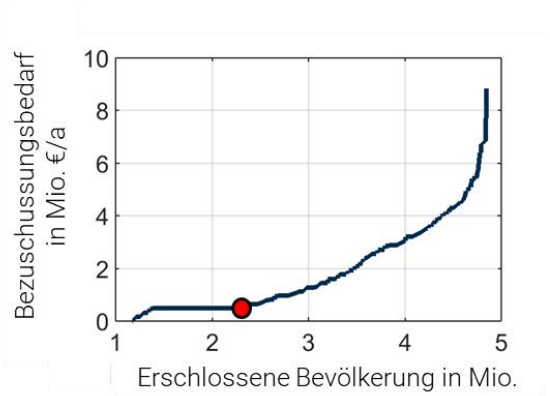


Abbildung 14: Netzwerkgestalt für ein Ergebnis mit geringem Bezuschussungsbedarf aber vergleichsweise hohem Nutzen

Derartige Effekte lassen sich im weiteren Verlauf der Pareto-Front jedoch nicht in diesem Maße beobachten. Abbildung 15 zeigt ein HRS-Netzwerk, das etwa 3,5 Mio. Personen den Umstieg auf ein FCEV ermöglicht und einen Bezuschussungsbedarf von etwa 2 Mio. €/a aufweist. Gegenüber der vorherigen Variante sind zusätzliche HRS in Berlin und Rostock vorgesehen.

Der starke Anstieg des Bezuschussungsbedarfs am Ende der Pareto-Front ist darauf zurückzuführen, dass bei einem fortgeschrittenen HRS-Zubau die besten Standorte bereits belegt sind. Die Anzahl geeigneter Standorte ist grundsätzlich bereits durch die Anzahl der

betrachteten Städte begrenzt. Sollen weitere Personen erschlossen werden, so müssen HRS in weniger dicht besiedelten Gebieten innerhalb dieser Städte positioniert werden. Da die Kosten dieser HRS nicht geringer sind aber weniger Personen damit erreicht werden können, steigt der Bezuschussungsbedarf je Person stark an. Würden mehr als die zwölf untersuchten Städte als mögliche Standorte zugelassen, würde sich der Verlauf entsprechend ändern. Insgesamt zeigt sich, dass einige Standorte einen besonderen Nutzen für das Gesamtnetzwerk aufweisen und somit eine strategische Bedeutung für den weiteren HRS-Ausbau haben. Dazu zählen Halle (Saale), Jena und Dresden.

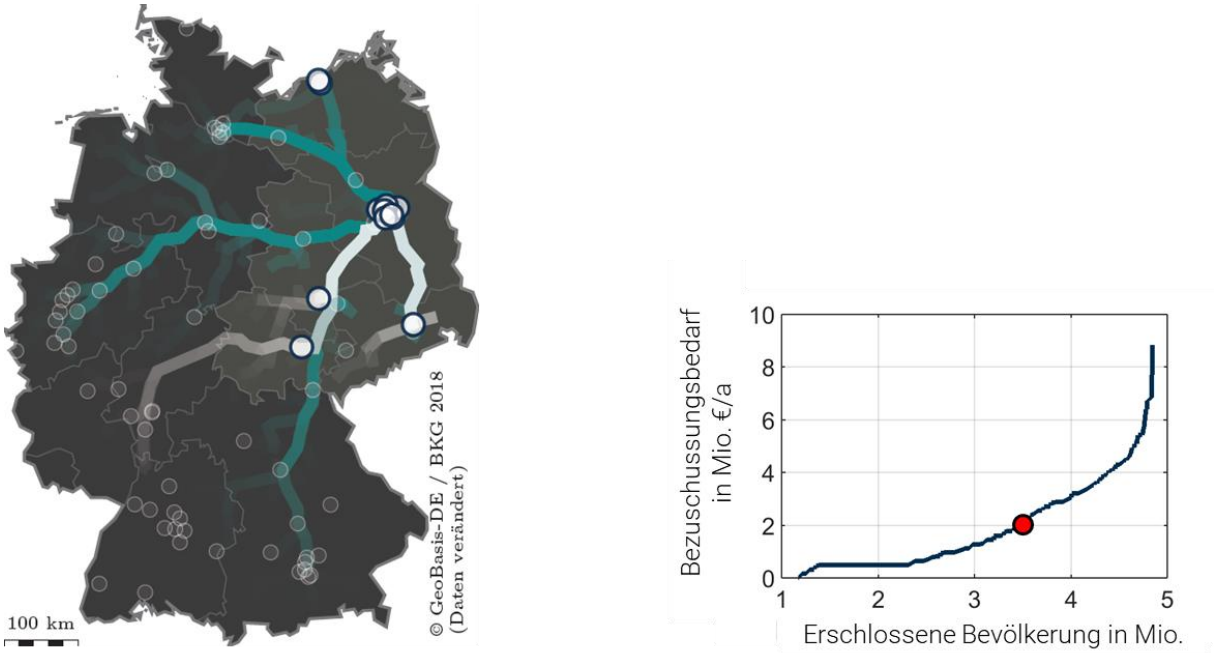


Abbildung 15: Netzwerkgestalt für ein Ergebnis mit mittlerem Bezuschussungsbedarf

5. Ergebnisverwertung

Das Projekt wurde mit dem Ziel durchgeführt, den Aufbau einer Initialinfrastruktur für HRS durch Flotten als planbare Nachfrager so zu entwerfen, dass sie allen Anforderungen, auch privater Nutzer, gerecht wird. Diese Vorgehensweise unterstützt gleichzeitig die bestehende Initiative H2 MOBILITY, insbesondere in der HYPOS-Region. Dadurch können die Hürden zum Aufbau weiterer Tankstellen erheblich reduziert werden. Die Phase geringer Wasserstoffnachfrage durch private Pkw wird durch die Flottennutzung abgefangen und so ist der Betrieb einer HRS über einen langen Zeitraum möglich, was die Voraussetzung für einen zukünftigen Markthochlauf von FCEV darstellt.

Die entwickelten Berechnungs- und Simulationsmodelle wurden so entwickelt, dass mit geringem Aufwand in laufenden und zukünftigen Projekten und Forschungsarbeiten angewendet werden können. Die Übertragbarkeit besteht nicht nur für andere Regionen/Länder sondern auch auf andere Felder der Mobilität, wie zum Beispiel die Ausweitung der Methodik auf alle gasförmigen Kraftstoffe und deren Netzwerknutzen.

5.1 Veröffentlichungen

Methoden und Ergebnisse des Projekts wurden sowohl in wissenschaftlichen Journalen als auch bei Veranstaltungen und Konferenzen veröffentlicht.

5.1.1 „International Journal of Hydrogen Energy“

Ein Teil der Ergebnisse dieses Projekts wurde unter dem Titel „Optimized electrolyzer operation: Employing forecasts of wind energy availability, hydrogen demand, and electricity prices“ im International Journal of Hydrogen Energy veröffentlicht. In dem Beitrag wurde eine Strategie für einen intelligenten Elektrolysebetrieb vorgestellt und evaluiert. Diese Betriebsstrategie ist relevant für HRS mit Onsite-Elektrolyse und wurde für diesen Fall in dem Journal-Beitrag simuliert und bewertet. Dabei wurden u.a. Prognosen für Wasserstoffnachfrage und Windenergieverfügbarkeit berücksichtigt.

5.1.2 Beitrag im Journal „Applied Energy“

Basierend auf Ergebnissen dieses Projekts zum Thema Carsharing mit Brennstoffzellenfahrzeugen wurde ein Beitrag für das Journal „Applied Energy“ verfasst. Dabei wurde mit der civity Management Consultants GmbH & Co. KG zusammengearbeitet, die für dieses Projekt Daten zum Tankverhalten von Carsharing-Fahrzeugen bereitgestellt hat. Der Beitrag behandelt die Auslegung von HRS für Flotten von Brennstoffzellen-Carsharing-Fahrzeugen unterschiedlicher Größe.

5.1.3 Vorstellung der Projektergebnisse auf Veranstaltungen und Konferenzen

Auf Basis der im Projekt erzielten Ergebnisse wurde ein Beitrag zur „European Fuel Cell Conference & Exhibition“ in Neapel, Italien eingereicht und dort präsentiert. Der Beitrag wurde mit dem Best Paper Award (2. Platz) ausgezeichnet. Basierend auf diesem Beitrag entstand der oben genannte Beitrag im International Journal of Hydrogen Energy (siehe Kapitel 5.1.1).

Die Ergebnisse dieses Projekts flossen in einen Beitrag ein, der für das „31st International Electric Vehicle Symposium“ erfolgreich eingereicht wurde. Diese Konferenz fand vom 30.09.2018 bis zum 03.10.2018 in Kobe, Japan statt. Der Beitrag schätzt den Bedarf an HRS auf Basis des bestehenden Netzes konventioneller Tankstellen ab.

Die Ergebnisse wurden zudem im Rahmen eines Vortrags auf dem HYPOS-Forum 2018 (16.10.2018 & 17.10.2018) einem Fachpublikum vorgestellt. Zusätzlich wurden die Ergebnisse bei der Jahresveranstaltung der Cleantech Initiative Ostdeutschland im Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (24.10.2018) vorgetragen. Am 08.11.2018 fand das 7. Wirtschaftsgespräch im Cluster Umwelt zusammen mit dem 5. HYPOS-Dialog in Leipzig statt. Einige Projektergebnisse wurden auch dort im Rahmen eines Vortrags vorgestellt. Darüber hinaus wurde sowohl auf dem zweitägigen Fachforum Wasserstoff und Brennstoffzellen (26. – 27.03.2019) des DBI Gastechnologischen Instituts sowie bei der Konferenz „HydrogenDays“ in Prag (27.03.2019 – 29.03.2019) ein Vortrag über die Projektergebnisse gehalten.

5.1.4 Verwertbarkeit der entwickelten Methoden & Ergebnisse

Die im Rahmen des Projekts entwickelten Methoden zur Bestimmung von optimalen Standorten von HRS konnte bereits in weiteren Projekten eingesetzt werden. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur sollen mit Hilfe von Algorithmen, welche auf der Methodik von ImplaN aufbauen, mögliche Infrastruktur-Ausbaupfade für Wasserstoff-, CNG- und LNG-Tankstellen ermittelt werden. Hierdurch kann die Methodik nicht nur regional, sondern auch technologisch breiter angewendet werden. Für einen Akteur der Wasserstoffwirtschaft konnten zudem deutschlandweite Analysen für Tankstellenstandorte durchgeführt werden, bei denen die Methodik ebenfalls eingesetzt wurde. Somit sind schon einige der kurz- und mittelfristigen, als auch die langfristigen Ziele hinsichtlich der Verwertbarkeit erfüllt.

Weitere internationale Anfragen nach der Methodik lassen zudem darauf schließen, dass auch zukünftig Interesse an den Projektergebnissen bestehen wird.

6. Literaturverzeichnis

[1] Clean Energy Partnership, „Press-release: Environment Minister Franz Untersteller opend a stand-alone hydrogen filling station in Stuttgart," 2013.

[2] Huétink et. al, „Initial infrastructure development strategies for the transition to sustainable mobility," *Technological Forecasting and Social Change,* 2010.

[3] Stephens-Romero et. al, „Projecting full build-out environmental impacts and roll-out strategies associated with viable hydrogen fueling infrastructure strategies," *International Journal of Hydrogen Energy,* 2011.

[4] „Studie im Auftrag des BMVBS," *GermanHy,* 2009.

[5] Seydel, „Entwicklung und Bewertung einer langfristigen regionalen Strategie zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur – auf Basis der Modellverknüpfung eines Geografischen Informationssystems und eines Energiesystemmodells," *Dissertation,* 2008.

[6] Krieg, „Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff," Bd. Band 144 von Schriften des Forschungszentrums Jülich: Reihe Energie & Umwelt, 2012.

[7] Baufumé et. al., „GIS-based scenario calculations for a nationwide German hydrogen pipeline infrastructure," *International Journal of Hydrogen Energy,* Bd. Volume 38, Nr. Issue 10, 2013.

[8] Robinius, „Strom- und Gasmarktdesign zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff," *Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment,* 2015.

[9] „Wasserstoffbusse in Stuttgart," SSB, [Online]. Available: http://www.ssb-ag.de/Brennstoffzellenhybridbus-987-0.html. [Zugriff am 18 05 2016].

[10] HyCologne Wasserstoff Region Rheinland e.V., „Wasserstoffbusse in Köln," [Online]. Available: http://www.hycologne.de/de_DE/wasserstoffbetriebene-brennstoffzellen-hybridbusse-jetzt-im-linienverkehr/. [Zugriff am 18 05 2016].

[11] Hamburger Hochbahn AG, „Wasserstoffbusse in Hamburg," [Online]. Available: https://www.hochbahn.de/wps/portal/de/Home/Naechster_Halt/Ausbau_und_Projekte/Innovationslinie_109. [Zugriff am 18 05 2016].

[12] The Linde Group, „FCEV-Carsharing," [Online]. Available: http://www.the-linde-group.com/de/clean_technology/clean_technology_portfolio/. [Zugriff am 18 05 2016].

[13] Ogden et. al., „Analysis of a "cluster" strategy for introducing hydrogen vehicles in

Southern California," *Energy Policy,* 2011.

[14] Lines et. al., „A rental car strategy for commercialization of hydrogen in Florida," *International Journal of Hydrogen Energy,* 2008.

[15] D. T. Smolinka, C. Voglstätter und E. Sicha, „Wasserstoff-Infrastrutkur für eine nachhaltige Mobilität," e-mobil BW GmbH, Stuttgart, 2013.

[16] Linne+Krause Marketing-Forschung, „Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit des Taxigewerbes in der Bundeshauptstadt Berlin," Hamburg, 2016.

[17] D. B. Reuter, D. M. Faltenbacher, D. O. Schuller, N. Whitehouse und S. Whitehouse, „New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots, High-Level Techno-EconomicProject Summary Repor," *High-Level Techno-Economic Project Summary Report,* 2017.

[18] C. Greiner, M. Korpas and A. Holen, "A Norwegian case study on the production of hydrogen from wind power," *International Journal of Hydrogen Energy,* vol. 32, no. 10-11, pp. 1500-1507, 2007.

[19] T. Smolinka, M. Günther and J. Garche, "Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien," *Kurzfassung des Abschlussberichtes NOW-Studie,* 2011.

[20] C. Noack, F. Burggraf, S. S. Hosseiny, P. Lettenmeier, S. Kolb, S. Belz, J. Kallo, K. A. Friedrich and T. Pregger, "Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck," 2014.

[21] "Hydrogen Delivery - Technical Team Roadmap," United States Driving Research and Innovation for Vehicle Efficiency and Energy sustainability, 2013.

[22] A. Elgowainy and K. Reddi, "Hydrogen fueling station pre-cooling analysis," Argonne National Laboratory, 2015.

[23] K. Stolzenburg, R. Hamelmann, M. Wietschel, F. Genoese, J. Michaelis, J. Lehmann, A. Miege, S. Krause, C. Sponholz and S. Donadei, "Integration von Wind-Wasserstoff-Systemen in das Energiesystem," NOW-Studie, Berlin, 2014.

[24] P. Hill and M. Penev, "Hydrogen Fueling Station in Honolulu, Hawaii Feasibility Analysis," 2014.

[25] G. Parks, R. Boyd, J. Cornish and R. Remick, "Hydrogen Station Compression, Storage, and Dispensing Technical Status and Costs: Systems Integration," National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2014.

[26] U. Bünger, H. Landinger, E. Pschorr-Schoberer, P. Schmidt, W. Weindorf, J. Jöhrens, U. Lambrecht, K. Naumann and A. Lischke, "Power-to-Gas (PtG) im Verkehr-Aktueller Stand und Entwicklungsperspektiven," 2014.

[27] P. I. Dahl, U. Bünger, S. Völler, M. Korpaas and S. Moller-Holst, "Hydrogen for transport from renewable energy in Mid-Norway," 2013.

[28] S. Lüers, A.-K. Wallasch and K. Rehfeldt, "Kostensituation der Windenergie an Land in Deutschland - Update," Deutsche Windguard, 2015.

[29] J. McKinney, E. Bond, M. Crowell und E. Odufuwa, „Joint agendy staff report on assembly bill 8: assessment of time and cost needed to attain 100 hydrogen refueling stations in California," California Energy Comission and California Air Resources Board, 2015.

[30] Statistisches Bundesamt, „Zensus 2011 - Einwohnerzahl je Hektar," Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Wiesbaden, 2015.

[31] J. Hartmann, „Anforderungen an die räumliche Verfügbarkeit von Wasserstofftankstellen und Ladesäulen im Kontext des heutigen Tankstellennetzes," 2017.

[32] M. Dr.-Ing. Schubert, „Verkehrsverflechtungsprognose 2030 - Zusammenfassung der Ergebnisse," Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2014.

[33] „Strategieplattform Power-to-Gas," [Online]. Available: http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte.html. [Zugriff am 05 08 2013].

[34] J. Matics, „Betriebliche Modellierung, Auslegung und Management von dezentralen Energiesystemen," Universität Duisburg-Essen, 2007.

[35] T. Smolinka, M. Günther und J. Garche, „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien. Kurzfassung des Abschlussberichts," NOW, Freiburg, 2011.

[36] M. Wenske, „Stand der Elektrolyse und zukünftige Entwicklungen," in *DBI FF-H2*, Berlin, 2001.

[37] M. Barisic, Interviewee, *Dynamische Betriebsweisen Alkalischer Elektrolyseure.* [Interview]. 04 06 2013.

[38] M. Waidhas, „Elektrolyse – neue Potenziale in einer sich verändernden Energielandschaft," in *DWV-Jahrespressekonferenz*, Berlin, 14.02.2012.

[39] M. Wenske, „Wasserstoff – Herstellung per Elektrolyse," FH Stralsund, Stralsund, 2008.

[40] R. Donnerbauer, „Elekrtolyse: das Rückrat von Power-to-Gas," *VDI Nachrichten,* 15.02.2013.

[41] T. Pregger, D. Graf, W. Krewitt, C. Sattler und S. Möller, „Perspektiven solarthermischer Verfahren zur Wasserstofferzeugung," Deutsches Zentrum für

Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Stuttgart, 2008.

[42] „Alternative Energy News," 05 10 2006. [Online]. Available: http://www.alternative-energy-news.info/hydrogen-electrolyzer-award/. [Zugriff am 04 09 2013].

[43] Proton Energy Systems, „High Performance, Low Cost Hydrogen Generation from Renewable Energy," 2012.

[44] S. Anger und e. al, „Wirkungsgradvergleich verschiedener P2G Verschaltungsszenarien unter Einsatz von Hochtemperaturelektrolyse und Methanisierung," in *Sächsisches Forum für Brennstoffzellen und Energiespeicher*, 2012.

[45] M. Wenske, „2020 - Entwicklungsziele von alkalischen Elektrolysesystemen," in *DBI-Fachkonferenz*, Berlin, 2013.

[46] Strategieplattform Power to Gas, „Eckpunktepapier," 18 06 2013. [Online]. Available: http://www.dena.de/en/press-releases/pressemitteilungen/promoting-co2-reduction-with-power-to-gas.html. [Zugriff am 22 05 2014].

[47] greenfacts, DVGW, „Wo aus Wind und Sonne grünes Gas wird - Power-to-Gas Projekte in Deutschland," 2013.

[48] H. Hermann, L. Emele und C. Loreck, „Prüfung der klimapolitischen Konsistenz der Kosten von Methanisierungsstrategien," Berlin, 2014.

[49] D. M. Specht, „Power to Gas – zwischen Mythos und Wahrheit," in *dena Jahreskonferenz Power to Gas 2014*, Berlin, 2014.

[50] Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie, „Jahresbericht 2013," Berlin, 2013.

[51] T. Kretschmer, „Innovative Elektrolyse - Schlüsseltechnologie für Energiespeicherlösungen," in *Enertec*, Leipzig, 29.01.2015.

[52] „Strategieplattform Power-to-Gas," [Online]. Available: http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte.html. [Zugriff am 01 04 2015].

[53] Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz und TU Wien, „Power to Gas - eine Systemanalyse," 2014.

[54] Hamburger HOCHBAHN, „Unser Antrieb für Hamburg," [Online]. Available: http://www.hochbahn.de/wps/portal/de/home/hochbahn/aktuelles/Innovationslinie+Site?1dmy&current=true&urile=wcm:path:/Hochbahn_Content/home/hochbahn/aktuelles/Innovationslinie+Site. [Zugriff am 09 04 2015].

[55] M. Sterner, „"Power-to-Gas - Zwischen Mythos und Wahrheit"," in *dena Jahreskonferenz Power-to-Gas*, Berlin, 2014.

[56] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „„Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?",“ GermanHy, Berlin, 2009.

[57] P. Blechinger, Assessment of the Global Potential for Renewable Energy Storage Systems on Small Islands, Berlin: SienceDirect, 03.01.2015.