

## Initialinfrastruktur für Wasserstoffmobilität auf Basis von Flotten

Fabian Grüger

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 466

ISBN 978-3-95806-413-3





Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Energie- und Klimaforschung  
Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3)

# **Initialinfrastruktur für Wasserstoffmobilität auf Basis von Flotten**

Fabian Grüger

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 466

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-413-3

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten  
sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Herausgeber  
und Vertrieb:           Forschungszentrum Jülich GmbH  
Zentralbibliothek, Verlag  
52425 Jülich  
Tel.: +49 2461 61-5368  
Fax: +49 2461 61-6103  
zb-publikation@fz-juelich.de  
[www.fz-juelich.de/zb](http://www.fz-juelich.de/zb)

Umschlaggestaltung:   Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Titelbild:               © GeoBasis-DE/BKG 2018 (Daten verändert)

Druck:                  Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright:             Forschungszentrum Jülich 2019

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, Band / Volume 466

D 82 (Diss., RWTH Aachen University, 2019)

ISSN 1866-1793  
ISBN 978-3-95806-413-3

Vollständig frei verfügbar über das Publikationsportal des Forschungszentrums Jülich (JuSER)  
unter [www.fz-juelich.de/zb/openaccess](http://www.fz-juelich.de/zb/openaccess).



This is an Open Access publication distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/),  
which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

# INITIALINFRASTRUKTUR FÜR WASSERSTOFFMOBILITÄT AUF BASIS VON FLOTTEN

von Fabian Grüger

## KURZFASSUNG

Der heutige Straßenverkehr geht mit Problemen wie Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Ausstoß einher. Der Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) kann diese Probleme wirkungsvoll adressieren, ein Markthochlauf erfordert jedoch ein für PKW-Fahrer lokal und flächendeckend verfügbares Netzwerk aus Wasserstofftankstellen (HRS). Diese sind zu Beginn allerdings wegen Unterauslastung unwirtschaftlich. Eine Einführungsstrategie kann im gemeinsamen Einsatz von HRS und Flottenfahrzeugen bestehen, da diese nur lokale und keine flächendeckende Infrastruktur erfordern und eine Auslastung der HRS garantieren. So kann das HRS-Netzwerk schrittweise ergänzt werden.

Ziel dieser Arbeit ist deshalb, die Wirtschaftlichkeit von HRS für Carsharing-, Taxi- und Busflotten zu untersuchen und das Potential dieser Einführungsstrategie zu bewerten. Um dieses Ziel zu erreichen, werden zunächst einzelne HRS für Flotten mittels Optimierung hinsichtlich Wirtschaftlichkeit dimensioniert. Dazu wird für jeden Flottentyp ein Nachfrageprofil modelliert und mit einem Simulationsmodell einer HRS mit Elektrolyse und Windparkanbindung verbunden. Dann werden HRS für Flotten über Deutschland verteilt so ausgelegt und positioniert, dass ein Netzwerk mit möglichst großem Nutzen für private PKW-Fahrer entsteht. Für diese Optimierung wird eine eigens entwickelte Methode zur Bewertung der Qualität von HRS-Netzwerken verwendet. Abschließend wird geklärt, ob die so ermittelte Initialinfrastruktur ausreicht, um einen Markthochlauf von FCEV zu ermöglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von Flotten einen wirtschaftlichen HRS-Betrieb ermöglichen kann, wenn wenige Randbedingungen angepasst werden. Insbesondere die EEG-Umlage auf Windstrom steht gegenwärtig der Wirtschaftlichkeit entgegen. In jedem Fall sollte der Verkaufspreis von Wasserstoff mindestens leicht erhöht werden. Mit dem geplanten und hier zugrunde gelegten Ausbau des Netzwerks auf insgesamt 71 HRS wird etwa 1,2 Mio. Personen der Umstieg auf ein FCEV ermöglicht. Werden in den 80 größten Städten zusätzliche HRS für Flotten errichtet, können bis zu 17,5 Mio. Personen erschlossen werden. Aufbau und Betrieb der HRS müssten dann mit 34,5 Mio. € pro Jahr bezuschusst werden. Eine Analyse verschiedener Ausbaustufen des HRS-Netzwerks zeigt, dass einige Standorte besonders wichtig für das Netzwerk sind. Dazu zählen Hagen, Halle (Saale), Jena und Würzburg.

Um den Anforderungen an ein Mindestnetzwerk zu genügen, müssen 39 bis 99 zusätzliche HRS gezielt positioniert werden. Aufbau und Betrieb dieser HRS erfordern zusätzliche Mittel in Höhe von 6,1 Mio. € bis 15,5 Mio. € jährlich. Dieses Netzwerk bestünde dann insgesamt aus 110 bis 170 HRS. Demnach sind weniger HRS erforderlich als bisher geschätzt. Das gegenwärtige Ausbauziel sieht jedoch nur 100 HRS vor und sollte folglich erweitert werden, um den Markthochlauf von FCEV zu ermöglichen.

# INITIAL INFRASTRUCTURE FOR HYDROGEN MOBILITY ENABLED BY FLEETS

by Fabian Gröger

## ABSTRACT

Currently, road transportation is responsible for large shares of air pollution and CO<sub>2</sub> emissions. These problems could be addressed by deploying fuel cell electric vehicles (FCEVs), but FCEVs require a nation-wide hydrogen refueling station (HRS) network. During the initial phase of the infrastructure build, the utilization ratio of these refueling stations is too small to make them economically viable. One possible strategy would be to tie expansion of the HRS network to FCEV fleet operation, since these vehicles typically require only local HRS infrastructure and can guarantee a high HRS utilization ratio. This enables a stepwise HRS network expansion.

The goal of this thesis is to evaluate combined operation of HRS with carsharing, taxi and bus fleets in terms of profitability and to investigate this strategy's potential. In order to achieve this, the topology of HRS supplying fleets is optimized for profitability. For this purpose, hydrogen demand profiles are modeled for each fleet type and combined with a computer simulation of an HRS consisting of onsite electrolysis fed by a wind farm. HRS supplying fleets distributed across Germany are then designed and sited in such a way that they result in an HRS network yielding maximum benefit to private car owners. This optimization relies on a specially developed method for evaluating HRS network quality. Finally, it is determined whether the resulting initial hydrogen infrastructure provides adequately distributed and national coverage.

The results show that vehicle fleets are capable of enabling profitable HRS operation, if boundary conditions are altered. In particular, the EEG surcharge on wind power prevents profitable HRS operation. Also, the hydrogen selling price should be at least slightly increased. The currently planned network of 71 HRS would enable 1.2 m people to use FCEVs. By extending this network by building HRS for fleets in 80 major cities in Germany, up to 17.5 m people could switch to FCEVs, though this network requires subsidies for installation and operation of 34.5 m € per year. An analysis of different stages of the expansion indicates that some sites are particularly important to the utility of the network. Among these are Hagen, Halle (Saale), Jena and Würzburg.

In order to meet the requirement of an initial infrastructure providing national coverage, between 39 and 99 additional HRS must be sited and built. Consequently, installation and operation result in deficits of 6.1 m € to 15.5 m € per year. The resulting network consists of between 110 to 170 HRS, far less than current estimates of the required initial infrastructure. However, current network development plans envisage only 100 HRS. Thus, these plans should be expanded in order to enable accelerated deployment of FCEVs.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	1
1.2. Zielsetzung und Gliederung der Arbeit . . . . .	2
<b>2. Wasserstoff als Teil der Verkehrswende</b>	<b>5</b>
2.1. Verkehrswende . . . . .	5
2.1.1. Notwendigkeit einer Verkehrswende . . . . .	5
2.1.2. Elemente der Verkehrswende . . . . .	7
2.2. Mobilität auf Basis von Wasserstoff und Brennstoffzellen . . . . .	9
2.2.1. Brennstoffzellenfahrzeuge und Wasserstoffbereitstellung . . . . .	9
2.2.2. Wasserstofftankstellen und ihre Komponenten . . . . .	10
2.2.3. Bestand und Ausbauplan von Wasserstofftankstellen . . . . .	12
2.3. Zusammenfassung von Kapitel 2 . . . . .	13
<b>3. Literaturanalyse und vorangegangene Arbeiten</b>	<b>15</b>
3.1. Initialphase des Infrastrukturaufbaus . . . . .	15
3.1.1. Infrastruktur für hohe Marktdurchdringungen von FCEV . . . . .	16
3.1.2. Mindestinfrastruktur für einen Markthochlauf von FCEV . . . . .	18
3.1.3. Ansätze für einen schrittweisen Aufbau von Infrastruktur in der Initialphase . . . . .	20
3.1.4. Zusammenfassung von Kapitel 3.1 . . . . .	22
3.2. Modellierung von Wasserstoffnachfragern . . . . .	23
3.2.1. Modellierung von Bussen als Wasserstoffnachfrager . . . . .	23
3.2.2. Modellierung von Taxis als Wasserstoffnachfrager . . . . .	23
3.2.3. Modellierung von Carsharing-Fahrzeugen als Wasserstoffnachfrager . . . . .	24
3.2.4. Zusammenfassung von Kapitel 3.2 . . . . .	25
3.3. Auslegung und Betrieb von Wasserstoffsystemen . . . . .	25
3.3.1. Auslegung von Wasserstoffsystemen . . . . .	26
3.3.2. Betrieb von Wasserstoffsystemen . . . . .	27
3.3.3. Zusammenfassung von Kapitel 3.3 . . . . .	30
3.4. Nutzen von Tankinfrastruktur für private Nachfrager . . . . .	31
3.4.1. Tankverhalten privater PKW-Nutzer . . . . .	31
3.4.2. Ansätze zur Abbildung von „Tanken in der Nähe des Zuhauses“ . . . . .	33
3.4.3. Ansätze zur Abbildung von „Tanken auf dem Weg zu einem Ziel“ . . . . .	35
3.4.4. Sonstige Modelle und Ansätze zur Tankstellenpositionierung . . . . .	39

3.4.5.	Zusammenfassung von Kapitel 3.4 . . . . .	40
3.5.	Vorangegangene Arbeiten zu Modell- und Simulationsgrundlagen . . . . .	41
3.5.1.	Simulationsframework . . . . .	42
3.5.2.	Genetischer Algorithmus . . . . .	43
3.5.3.	Modelle der Komponenten einer Wasserstofftankstelle . . . . .	44
3.5.4.	Zusammenfassung von Kapitel 3.5 . . . . .	46
<b>4.</b>	<b>Nicht-lokale und lokale Nachfrager von Wasserstoff als Kraftstoff</b>	<b>47</b>
4.1.	Private PKW als nicht-lokale Nachfrager . . . . .	48
4.1.1.	Beschreibung und Anforderungen an Infrastruktur . . . . .	48
4.1.2.	Modellierung des Tankverhaltens . . . . .	50
4.2.	Busse als lokale Nachfrager . . . . .	54
4.2.1.	Beschreibung . . . . .	54
4.2.2.	Anforderungen an Infrastruktur . . . . .	54
4.2.3.	Modellierung des Tankverhaltens . . . . .	56
4.2.4.	Kosten von Brennstoffzellenbussen . . . . .	58
4.3.	Taxis als lokale Nachfrager . . . . .	59
4.3.1.	Beschreibung . . . . .	59
4.3.2.	Anforderungen an Infrastruktur . . . . .	60
4.3.3.	Modellierung des Tankverhaltens . . . . .	60
4.3.4.	Kosten von Brennstoffzellentaxis . . . . .	63
4.4.	Carsharing-Fahrzeuge als lokale Nachfrager . . . . .	64
4.4.1.	Beschreibung . . . . .	64
4.4.2.	Anforderungen an Infrastruktur . . . . .	65
4.4.3.	Modellierung des Tankverhaltens . . . . .	66
4.4.4.	Kosten von Carsharing-Fahrzeugen mit Brennstoffzelle . . . . .	69
4.5.	Zusammenfassung von Kapitel 4 und Literaturabgleich . . . . .	70
<b>5.</b>	<b>Auslegung einer H<sub>2</sub>-Initialzelle</b>	<b>73</b>
5.1.	Methodik . . . . .	74
5.1.1.	Topologieoptimierung . . . . .	74
5.1.2.	Simulationsmodell . . . . .	75
5.2.	Ergebnisse . . . . .	81
5.2.1.	Wasserstoffgestehungskosten und Systemauslegung . . . . .	81
5.2.2.	Wirtschaftlichkeit . . . . .	89
5.2.3.	Sensitivitätsanalyse . . . . .	92
5.3.	Zusammenfassung von Kapitel 5 und Literaturabgleich . . . . .	99
<b>6.</b>	<b>Auslegung eines H<sub>2</sub>-Initialnetzwerks</b>	<b>103</b>
6.1.	Methodik . . . . .	104
6.1.1.	Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit der Infrastruktur . . . . .	108
6.1.2.	Methode zur Quantifizierung des Nutzens eines HRS-Netzwerks für private Nachfrager . . . . .	109

6.1.3.	Optimierungsschritt 1: Optimale Positionen für HRS finden . .	112
6.1.4.	Optimierungsschritt 2: Optimale Flottenkombinationen und HRS- Anzahlen finden . . . . .	116
6.1.5.	Optimierungsschritt 3: Optimales Netzwerk aus HRS und Flot- ten bestimmen . . . . .	117
6.2.	Szenarien . . . . .	120
6.2.1.	Szenarien 1a und 1b: Detailanalyse für die neuen Bundesländer	121
6.2.2.	Szenarien 2a, 2b und 2c: Übertragung auf das Bundesgebiet . .	124
6.3.	Ergebnisse . . . . .	127
6.3.1.	Optimale Tankstellenpositionen . . . . .	127
6.3.2.	Optimale Flottenkombinationen . . . . .	135
6.3.3.	Optimales Gesamtnetzwerk aus HRS und Flotten . . . . .	138
6.4.	Zusammenfassung von Kapitel 6 und Literaturabgleich der Annahmen	152
6.5.	Literaturabgleich der Ergebnisse und Gesamtdiskussion . . . . .	156
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>163</b>
	<b>Anhang</b>	<b>167</b>
<b>A.</b>	<b>Ausblick</b>	<b>169</b>
<b>B.</b>	<b>Kostenparameter HRS</b>	<b>171</b>
<b>C.</b>	<b>Bestimmung von Wasserstoffgestehungskosten</b>	<b>175</b>
<b>D.</b>	<b>Anhang zu Kapitel 5</b>	<b>177</b>
<b>E.</b>	<b>Anhang zu Kapitel 6</b>	<b>183</b>
<b>F.</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>189</b>
<b>G.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>191</b>
<b>H.</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>193</b>
<b>I.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>195</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>209</b>



# 1. Einleitung

Im Jahr 2016 entfielen 87% der Personenbeförderungsleistung und 63% der Güterverkehrsleistung in Deutschland auf den Straßenverkehr [1]. So wertvoll der heutige Straßenverkehr für individuelle Mobilität und den Warentransport ist, so schwerwiegend sind die Probleme, die er verursacht. Ein großer Teil der Treibhausgas (THG)-Emissionen ist auf die Verbrennung fossiler Kraftstoffe zum Antrieb von Straßenfahrzeugen zurückzuführen. Zusätzlich entstehen Schadstoff- und Lärmemissionen, die insbesondere in Städten eine Belastung von Umwelt und Bevölkerung darstellen. Deshalb verfolgt die Bundesregierung ehrgeizige Ziele zur Reduktion insbesondere der THG-Emissionen [2], während andere Akteure aus Gesellschaft und Politik den Druck erhöhen, die Schadstoffbelastung der Luft in Städten zu reduzieren [3], [4].

Der Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen (Englisch: Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV) mit Wasserstoff als Kraftstoff ist ein wichtiges Element zur Lösung der beschriebenen Probleme, da diese Technologie lokal emissionsfrei ist. Wichtig ist jedoch, dass Emissionen bei der Herstellung von Wasserstoff weitestgehend vermieden werden, weshalb dazu Elektrolyse und erneuerbare Energien eingesetzt werden sollten. Während es bereits FCEV auf dem Markt gibt [5], [6], erfüllt die bestehende Tankinfrastruktur in Form von Wasserstofftankstellen (Englisch: Hydrogen Refueling Stations, HRS) noch nicht die Anforderungen der Autofahrer an Flächendeckung. Gegenwärtig gibt es ein Netzwerk aus etwa 40 HRS, das auf mindestens 100 HRS erweitert werden soll [7].

Der weitere Aufbau ist mit besonderen Herausforderungen verbunden, die in Kapitel 1.1 erläutert werden. Diese Arbeit beschreibt, untersucht und bewertet einen Ansatz zur Minderung dieser Probleme und soll damit einen Teil der Problemlösung darstellen. Die einzelnen Ziele sowie die Gliederung der Arbeit werden in Kapitel 1.2 vorgestellt.

## 1.1. Motivation

Bei der Einführung von Wasserstoff als Kraftstoff genügt ein Angebot von Fahrzeugen alleine nicht. Damit FCEV einen gleichwertigen Ersatz für konventionelle Fahrzeuge darstellen, müssen sie den Mobilitätsbedürfnissen von Autofahrern gerecht werden. Dabei spielen verschiedene Fahrzeugeigenschaften wie Höchstgeschwindigkeit, Reichweite und Tankdauer, insbesondere aber die Verfügbarkeit von Tankinfrastruktur

## 1. Einleitung

eine zentrale Rolle. Werden gegenwärtig jedoch neue HRS aufgebaut, so sind diese wegen des geringen Bestands an FCEV stark unterausgelastet und somit nicht wirtschaftlich betreibbar. Gleichzeitig fordern Fahrer von FCEV aber unabhängig vom Gesamtbestand an Fahrzeugen, dass sie ihr Fahrzeug mindestens in Deutschland nahezu überall auftanken können. Das heißt, der Vergrößerung des Fahrzeugbestands steht ein zu wenig ausgebautes HRS-Netzwerk entgegen und der Ausbau eben dieses Netzwerks ist wegen des geringen Fahrzeugbestands unwirtschaftlich. Dieser Zusammenhang erschwert insbesondere eine schrittweise Erweiterung von Fahrzeugbestand und Infrastruktur.

Das Unternehmen H2 Mobility Deutschland GmbH & Co. KG (im Folgenden H2 Mobility genannt) verfolgt deshalb das Ziel, eine ausreichende Mindestinfrastruktur zu schaffen, die Einwohnern den Einsatz eines FCEV erlaubt. Dazu sollen insgesamt 100 HRS in Deutschland errichtet werden. Eine darüber hinausgehende Erweiterung des HRS-Netzwerks auf bis zu 400 HRS soll nur dann erfolgen, wenn der Fahrzeugbestand ausreichend anwächst.

Es ist jedoch unklar, ob ein Initialnetzwerk von 100 HRS die Anforderungen an eine Mindestinfrastruktur erfüllt und ob es ausreichend vielen Fahrern den Umstieg auf ein FCEV ermöglicht. Der Fall, dass das geplante Initialnetzwerk nicht ausreichend ist, kann bedeuten, dass diese HRS wegen mangelnder Wirtschaftlichkeit abgebaut und Wasserstoff nicht als Kraftstoff in Deutschland etabliert werden kann. Es ist folglich erstens erforderlich, eine Methode und ein Maß zur Bewertung des Nutzens der Gestalt von HRS-Netzwerken für private PKW-Fahrer zu entwickeln. So können die Voraussetzungen für einen erfolgreichen Markthochlauf von FCEV bestimmt werden. Zweitens fehlt es an einer über den bestehenden Plan zum Ausbau des HRS-Netzwerks hinausgehenden Strategie, wie das beschriebene Dilemma aufgelöst werden kann.

Ein Ansatz, um ein HRS-Netzwerk schrittweise aufzubauen, kann darin bestehen, Flottenfahrzeuge wie Busse oder Taxis in Kombination mit HRS einzusetzen. Diese Fahrzeuge benötigen nur eine lokale und keine flächendeckende Infrastruktur, sodass das zuvor beschriebene Problem hier nicht besteht. So können einzelne HRS zum Netzwerk ergänzt werden, die durch die Flottenfahrzeuge ausgelastet werden. Es ist jedoch unklar, welches Potential der Einsatz von Flottenfahrzeugen hat und wie eine gezielte Strategie zum großflächigen Aufbau von HRS in Kombination mit Flottenfahrzeugen aussehen sollte.

## 1.2. Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

In dieser Arbeit wird Wasserstoffinfrastruktur für Fahrzeugflotten in Deutschland untersucht, um das Problem nicht ausgelasteter HRS und einer fehlenden Flächendeckung des HRS-Netzwerks in der Initialphase des Infrastrukturaufbaus zu überwinden. Die Wasserstoffinfrastruktur soll so ausgelegt werden, dass sie einerseits lokal die Anforderungen der Flotten erfüllt, während andererseits das entstehende Netz aus

Wasserstofftankstellen möglichst vielen privaten Fahrern den Umstieg auf ein FCEV erlaubt. Gegenstand der Betrachtung sind Carsharing-, Taxi- und Busflotten in bis zu 80 Städten in Deutschland. Es sollen folgende vier Forschungsfragen behandelt und beantwortet werden:

1. Unter welchen Voraussetzungen kann der Einsatz von Flottenfahrzeugen die Wirtschaftlichkeit von HRS verbessern?
2. Wie und wo sollten Flotten mit HRS kombiniert werden, um das HRS-Netzwerk für private PKW aufzuwerten?
3. Wie viele HRS sind für eine ausreichende Mindestinfrastruktur nötig?
4. Kann der Ansatz, Flotten und HRS gemeinsam einzusetzen eine ausreichende Mindestinfrastruktur induzieren?

Die Untersuchung erfolgt dazu in drei Schritten. Nach einem Überblick über die Grundlagen (siehe Kapitel 2) und einer Literaturanalyse (siehe Kapitel 3) werden im ersten Schritt zunächst Fahrzeugflotten und private PKW betrachtet (siehe Kapitel 4). Die Anforderungen der Flottentypen an Tankinfrastruktur sowie ihr Tankverhalten werden modelliert. Ergebnis dieses Schritts bilden zeitlich aufgelöste Nachfrageprofile für verschiedene Flottentypen und -größen sowie für private PKW.

Diese Profile dienen als Randbedingung für den zweiten Schritt. In diesem wird eine prototypische Wasserstoff-Initialzelle ( $H_2$ -Initialzelle) betrachtet, die aus einer Wasserstofftankstelle mit Wasserstoffproduktion mittels Onsite-Elektrolyse, einer oder mehrerer Windenergieanlagen (WEA) zur Stromversorgung sowie Flottenfahrzeugen als Nachfrager besteht (siehe Kapitel 5 und Abbildung 1.1). Eine Verwendung von Photovoltaik-Anlagen alternativ oder zusätzlich zu WEA wäre ebenso denkbar, wird hier aber aus Gründen der Vereinfachung nicht betrachtet.

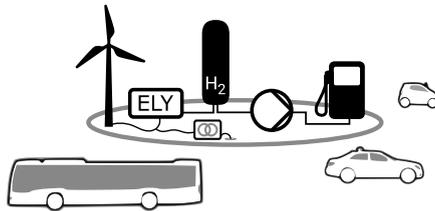


Abbildung 1.1.: Schematische Darstellung einer Wasserstoff-Initialzelle

Die einzelnen Komponenten — Wasserstoffspeicher, -verdichter und -zapfsäule sowie WEA und Elektrolyseur — werden für verschiedene Flottenzusammensetzungen und -größen mittels Optimierung ausgelegt. Randbedingung der Auslegung ist, dass auch private Fahrzeuge zusätzlich versorgt werden können müssen. Ziel der Optimierung sind minimale Wasserstoffgestehungskosten. Nach diesem Schritt ist bekannt, welche Infrastruktur jede Flottenkombination erfordert. Auf Basis der mit dieser Auslegung

## 1. Einleitung

verbundenen Wasserstoffgestehungskosten und der Flottennachfrage wird die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen  $H_2$ -Initialzelle quantifiziert.

Diese Informationen fließen in den dritten Schritt ein, in dem viele mögliche  $H_2$ -Initialzellen im Betrachtungsgebiet untersucht werden (siehe Kapitel 6). Es wird ein Gesamtnetzwerk aus  $H_2$ -Initialzellen und Fahrzeugflotten ausgelegt, das eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit sowie einen möglichst hohen Nutzen für private Fahrer bieten soll. Dazu wird für jede der betrachteten Städte entschieden, ob und wo dort  $H_2$ -Initialzellen aufgebaut werden sollten. Voraussetzung ist eine Methodik zur Bewertung des Nutzens, die in Vorbereitung dieses Schrittes entworfen und umgesetzt wird. Dieser Schritt liefert die Daten zur Wirtschaftlichkeit sowie die Gestalt eines Wasserstoff-Initialnetzwerks und quantifiziert den Nutzen eines solchen für private Fahrer. Da die beiden Optimierungsziele nicht gleichzeitig erreicht werden können, stehen als Ergebnis mehrere Auslegungen nebeneinander, die jeweils unterschiedlich ausgeprägte Kompromisse aus Wirtschaftlichkeit und Nutzen darstellen.

Abbildung 1.2 fasst im linken Bereich die Verknüpfung der drei Hauptteile dieser Arbeit und die jeweiligen Kernergebnisse (weiße Kästen) zusammen. Ein Hauptergebnis dieser Arbeit besteht in der Gestalt des ermittelten Wasserstoff-Initialnetzwerks (siehe Abbildung 1.2, rechts).

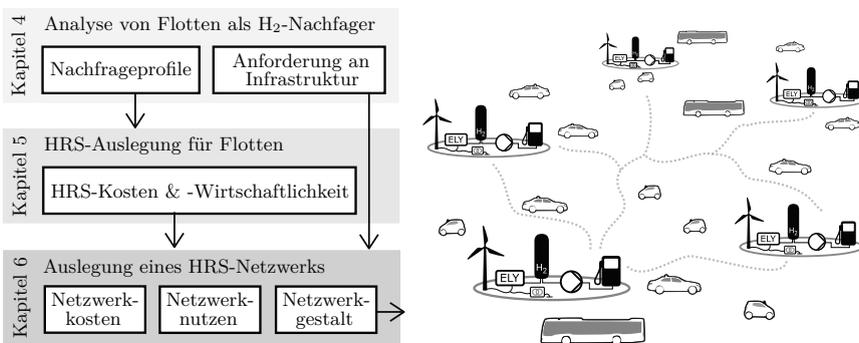


Abbildung 1.2.: Links: Überblick über die drei Hauptteile dieser Arbeit mit den jeweiligen Kernergebnissen (weiße Kästen). Rechts: Schematische Darstellung eines Wasserstoff-Initialnetzwerks, bestehend aus mehreren Wasserstoff-Initialzellen

## 2. Wasserstoff als Teil der Verkehrswende

In dieser Arbeit wird ein Ansatz entwickelt, beschrieben und untersucht, der Hürden bei der Etablierung von Wasserstoff als Kraftstoff im Verkehrssektor verringern kann. Insbesondere wird untersucht, ob der Aufbau von Wasserstofftankinfrastruktur für Flottenfahrzeuge so gestaltet werden kann, dass sie auch privaten Fahrern von FCEV nützt. Deshalb werden in diesem Kapitel zunächst Motivation und Wege für eine Abkehr von konventionellen Antrieben und Kraftstoffen beschrieben (siehe Kapitel 2.1). Anschließend wird das Konzept von Mobilität auf Basis von Wasserstoff und Brennstoffzellen erläutert (siehe Kapitel 2.2). Es wird gezeigt, welchen Stand der Aufbau von Wasserstofftankstellen in Deutschland erreicht hat und welche weiteren Ziele beim Aufbau bestehen. Diese werden mit dem Bestand konventioneller Tankstellen verglichen.

### 2.1. Verkehrswende

Der Straßenverkehr in Deutschland basiert seit vielen Jahrzehnten auf fossilen Kraftstoffen, mit Hilfe derer Verbrennungsmotoren Fahrzeuge antreiben. Kapitel 2.1.1 gibt einen Überblick über die daraus resultierenden Probleme und die Erfordernisse eines Wandels des Verkehrssektors. In Anlehnung an den Begriff der Energiewende, der einen grundlegenden Wandel in der Energiepolitik und -wirtschaft beschreibt, wird dieser Prozess Verkehrswende genannt. Welche Maßnahmen und Elemente zum Gelingen der Verkehrswende beitragen können, wird anschließend in Kapitel 2.1.2 beschrieben.

#### 2.1.1. Notwendigkeit einer Verkehrswende

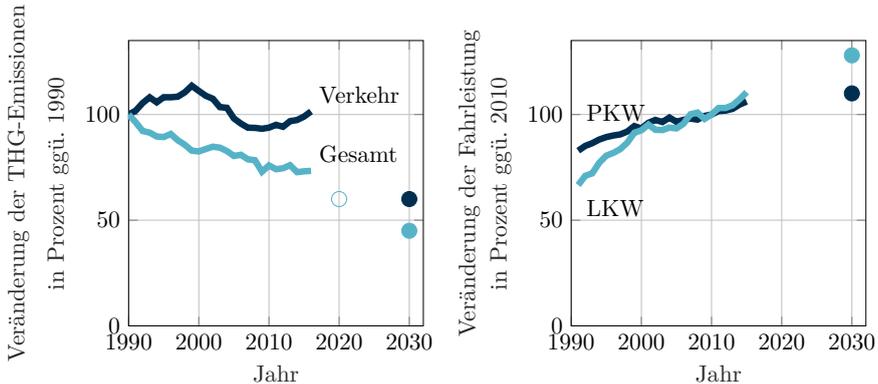
Die vom Menschen verursachten THG-Emissionen führen zur globalen Erwärmung mit vielfältigen negativen Auswirkungen. Auf der UN-Klimakonferenz in Paris im Jahr 2015 wurde deshalb ein Abkommen unterzeichnet, das die Begrenzung der Erderwärmung auf unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter vorsieht und somit eine erhebliche Reduktion des THG-Ausstoßes erfordert [8]. Das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) entsteht unter anderem bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen (zum Beispiel Kohle, Erdgas sowie Benzin- und Dieselmotorkraftstoff). Weltweit sind 65 % der anthropogenen THG-Emissionen auf die Nutzung fossiler Energieträger sowie auf Industrieprozesse zurückzuführen [9].

## 2. Wasserstoff als Teil der Verkehrswende

In Deutschland basiert der motorisierte Verkehr gegenwärtig zu großen Teilen auf fossilen Kraftstoffen [10]. Entsprechend waren der Personen- und Güterverkehr im Jahr 2016 für etwa 21 % der THG-Emissionen verantwortlich [11]. Davon entfielen 96 % auf den Straßenverkehr [11]. Während die Gesamtemissionen rückläufig sind, konnten die THG-Emissionen des Verkehrssektors gegenüber dem Bezugsjahr 1990 nicht gesenkt werden (siehe Abbildung 2.1a). Deutschland hat sich deshalb Ziele zur Verringerung der THG-Emissionen gesteckt, die neben Strom- und Wärme- teils auch den Verkehrssektor betreffen. So sollten gemäß dem Energiekonzept der Bundesregierung aus dem Jahr 2010 [12] die THG-Emissionen bis zum Jahr 2020 sektorenübergreifend um 40 % gegenüber dem Jahr 1990 gesenkt werden (siehe nicht ausgefüllte Markierung in Abbildung 2.1a). Dieses Ziel wurde mittlerweile als nicht mehr erreichbar eingeschätzt. Der „Klimaschutzplan 2050“ der Bundesregierung [2] aus dem Jahr 2016 weist erstmals ein separates THG-Reduktionsziel für den Verkehrssektor aus. Demnach sollen dessen THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 um 40 % bis 42 % gegenüber 1990 gesenkt werden (siehe dunkelblauer Kreis). Sektorübergreifend wird eine Emissionsreduktion in Höhe von 55 % bis 56 % angestrebt (siehe hellblauer, ausgefüllter Kreis). Gleichzeitig ist laut „Verkehrsverflechtungsprognose 2030“ [13] bis zum Jahr 2030 gegenüber 2010 mit einer Steigerung der Fahrleistung (gemessen in Fahrzeug-Kilometern) um 10 % für PKW und 28 % für LKW zu rechnen (siehe Abbildung 2.1b). Die THG-Emissionen im Verkehrssektor müssen also gesenkt werden, während der Verkehr voraussichtlich weiter zunehmen wird. Um die Klimaschutzziele zu erreichen, sind folglich weitreichende Maßnahmen erforderlich.

Neben THG-Emissionen führt der gegenwärtige Verkehr zu weiteren Problemen. So belasten die bei der Verbrennung von fossilen Kraftstoffen entstehenden Schadstoffe, vor allem Stickstoffdioxid, die Luftqualität insbesondere in Städten. Die Weltgesundheitsorganisation schätzt den volkswirtschaftlichen Schaden für Deutschland durch vorzeitige Todesfälle aufgrund mangelhafter Luftqualität auf 145 Mrd. USD für das Jahr 2010 [14]. Im Jahr 2017 wurde an etwa 46 % der verkehrsnahen Messstationen der zulässige Jahresmittelwert für Stickstoffdioxid überschritten [15]. Die Europäische Kommission hat aufgrund dieser anhaltenden Grenzwertüberschreitungen für 28 Gebiete ein Vertragsverletzungsverfahren gegen Deutschland eingeleitet [3]. Im Februar 2018 entschied das Bundesverwaltungsgericht nach einer Klage der Deutschen Umwelthilfe e.V., dass beschränkte Fahrverbote für Dieselfahrzeuge als Mittel zur Beschränkung der Emissionen in besonders belasteten Städten rechtlich nicht ausgeschlossen seien [4].

Neben Luftschadstoffemissionen verursacht der Straßenverkehr auch Lärmemissionen. Sind Menschen dauerhaft einem hohen Lärmpegel ausgesetzt, steigen die Risiken für insbesondere Herz-Kreislauf-Erkrankungen wie Arteriosklerose, Schlaganfall und Herzinfarkt [16]. Im Jahr 2011 waren laut Umweltbundesamt etwa 2,5 Mio. Menschen von einem dauerhaft zu hohen Lärmpegel durch Straßenverkehr betroffen [17]. Der Straßenverkehr wird von mehr als der Hälfte der unter Lärm leidenden Bürger als Hauptlärmquelle benannt [18].



- (a) Treibhausgas (THG)-Emissionen in Deutschland. 100 % entsprechen 1220 (Gesamt) und 164 Mt CO<sub>2</sub>-Äquivalent (Verkehr). Ziele sind als Kreise dargestellt (nicht-ausgefüllt: ehemaliges Ziel) [2], [11], [12]
- (b) Fahrleistungen von PKW und LKW in Deutschland. 100 % entsprechen 599 (PKW) und 78 Mrd. km (LKW). Prognosen sind als Kreise dargestellt [1], [13]

Abbildung 2.1.: Treibhausgasemissionen und Minderungsziele sowie Fahrleistungen und Prognosen

Ein weiteres Problem des heutigen Straßenverkehrs besteht in einer hohen Abhängigkeit von Kraftstoffen auf Basis von fossilen Energieträgern und Energieimporten. Im Jahr 2016 basierten etwa 95 % des Kraftstoffs auf fossilen Energieträgern [10]. Nur etwa 2,4 % des verwendeten Rohöls wiederum stammen aus Deutschland, der übrige Teil muss importiert werden [19]. Deutschland bezieht das Rohöl dabei zu etwa 40 % aus Russland, zu 12 % aus Norwegen, zu 10 % aus Großbritannien und zu 9 % aus Kasachstan [19].

Die genannten Probleme erfordern grundlegende und weitreichende Änderungen im Straßenverkehr, um die gewohnte Qualität an individueller Mobilität langfristig erhalten und die Lebensqualität in Städten wieder verbessern zu können — eine Verkehrswende.

### 2.1.2. Elemente der Verkehrswende

Die Elemente der Verkehrswende wurden vom Thinktank Agora Verkehrswende in die Kategorien „Mobilitätswende“ und „Energiewende im Verkehr“ unterteilt [20]. Maßnahmen der „Mobilitätswende“ sind demnach dadurch gekennzeichnet, dass durch sie das Verkehrsaufkommen oder der Energieverbrauch für Verkehr sinkt, ohne die

## 2. Wasserstoff als Teil der Verkehrswende

Mobilität einzuschränken. Dazu zählen sich änderndes Nutzerverhalten wie zum Beispiel eine andere Verkehrsmittelwahl und alternative Mobilitätsformen wie Car- und Ridesharing. Dem gegenüber stehen Maßnahmen einer „Energiewende im Verkehr“, mit denen der verbleibende Energiebedarf umwelt- und klimaschonend gedeckt werden kann. Dazu zählen beispielsweise batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicles — BEV) und FCEV. Voraussetzung ist, dass Strom und Wasserstoff mit Energie aus erneuerbaren Quellen hergestellt werden. Während BEV direkt Strom aus Erneuerbare-Energie-Anlagen verwenden können, wird Wasserstoff mittels Elektrolyse und Strom aus erneuerbaren Energien produziert. Dabei wird Wasser in die Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Dieses Verfahren wird auch Power-to-Gas (PtG) genannt und von Schiebahn et al. (2015) [21] ausführlich beschrieben. Alternative Ansätze sehen vor, aus dem so erzeugten Wasserstoff gemeinsam mit CO<sub>2</sub> Kohlenwasserstoffe, beispielsweise Methan zu erzeugen. Ist das Produkt gasförmig, wird auch dieser Prozess als PtG bezeichnet, ist es flüssig, spricht man von Power-to-Liquid (PtL). Die entstehenden Kraftstoffe können in konventionellen Otto- oder Dieselmotoren eingesetzt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, aus Biomasse erzeugte Kraftstoffe, sogenannte Biokraftstoffe, als Ersatz für Benzin und Diesel zu verwenden.

In Wissenschaft und Politik wird teils kontrovers diskutiert, welche Beiträge die verschiedenen Optionen zur Energiewende im Verkehr leisten können und wie sie priorisiert werden sollten. Manche Akteure bevorzugen für den PKW-Verkehr BEV wegen ihrer hohen Effizienz und somit sparsamen Primärenergieverwendung, während der Einsatz von Wasserstoff und synthetischen Kohlenwasserstoffen auf nicht direkt elektrifizierbare Teile des Verkehrs, wie Luft- und Seeverkehr, beschränkt werden soll [20], [22]–[24]. Hinsichtlich Wasserstoff als Kraftstoff stehen dem einerseits fahrzeug-spezifische Vorteile von FCEV wie eine tendenziell höhere Reichweite sowie erheblich kürzere Betankungsdauern und andererseits das Energiesystem betreffende Aspekte gegenüber [25]. Die Produktion von Wasserstoff ist grundsätzlich zeitlich flexibel und kann dem Dargebot an erneuerbarer Energie angepasst werden. Zudem kann Wasserstoff auch großskalig gespeichert und zur Versorgung des Stromsektors rückverstromt werden. Eine solche Verknüpfung des Strom- und des Verkehrssektors wird als Sektorkopplung bezeichnet und nützt der Energie- und Verkehrswende gleichermaßen. Stolten et al. (2013) [26] beschreiben das Potential und die Bedeutung von Wasserstoff für einen auf erneuerbaren Energien basierenden Strom- und Energiesektor. Darüber hinaus bestehen vielfältige Herausforderungen bei einer Umstellung auf BEV und FCEV, die unter anderem die Tank- und Ladeinfrastruktur betreffen. Bei höheren Marktdurchdringungen von BEV ist beispielsweise davon auszugehen, dass die Kapazität der Stromverteilnetze die Ladeleistung limitieren und einer weiteren Integration von BEV entgegenstehen kann [27], [28]. Die Vor- und Nachteile von BEV und FCEV sind daher teils komplementär, weshalb beide Optionen von der Bundesregierung und anderen Akteuren als wichtige Bausteine der Verkehrswende betrachtet werden [29], [30].

## 2.2. Mobilität auf Basis von Wasserstoff und Brennstoffzellen

Damit Wasserstoff als Kraftstoff genutzt werden kann, werden sowohl Brennstoffzellenfahrzeuge als auch eine Wasserstoffinfrastruktur benötigt. Diese umfasst Wasserstoffherzeugung, -transport sowie -tankstellen. Im Folgenden werden die Fahrzeuge und die Wasserstoffbereitstellungspfade beschrieben (siehe Kapitel 2.2.1) und die Komponenten von Wasserstofftankstellen erläutert (siehe Kapitel 2.2.2). Anschließend wird ein Überblick über den aktuellen Stand des HRS-Netzwerks und die geplante Netzwerkerweiterung gegeben (siehe Kapitel 2.2.3).

### 2.2.1. Brennstoffzellenfahrzeuge und Wasserstoffbereitstellung

FCEV werden von einem Elektromotor angetrieben, dessen Energiezufuhr durch eine Brennstoffzelle erfolgt. Diese wandelt gasförmigen Wasserstoff zusammen mit Luftsauerstoff in Wasser und elektrische sowie thermische Energie. Die Abgase von FCEV bestehen somit ausschließlich aus Wasserdampf und sind daher unschädlich für Umwelt und Klima. Die Funktionsweise von Brennstoffzellen und die Integration in Fahrzeuge wird von Froeschle et al. (2013) beschrieben [31]. Wasserstoff kann im Fahrzeug auf verschiedene Arten gespeichert werden, alle aktuell erhältlichen PKW verwenden allerdings Drucktanks mit 700 bar Speicherdruck. Alternative Speichermethoden sind eine tiefkalte, flüssige Lagerung sowie eine Kombination aus Druck- und Flüssigspeicher [32]. Gegenwärtige FCEV sind hybridisiert und verfügen über einen Akkumulator zur kurzfristigen Deckung von Leistungsspitzen und zur Rekuperation. Beispiele für aktuell erhältliche PKW-Modelle sind der Toyota Mirai sowie der Hyundai Nexo, die jeweils etwa 5 kg Wasserstoff speichern können, eine Motorleistung von 113 kW und 135 kW aufweisen und Reichweiten von etwa 500 km und 600 km erreichen [5], [6]. Derartige FCEV speichern Wasserstoff bei 700 bar und können an HRS je nach Umgebungsbedingungen innerhalb von etwa fünf Minuten vollständig betankt werden. Zum 01.01.2017 waren 230 FCEV [33] in Deutschland zugelassen. Brennstoffzellenbusse (Englisch: Fuel Cell Electric Buses, FCEB) verfügen typischer Weise über Motorleistungen zwischen 130 kW und 240 kW und Tankkapazitäten zwischen 30 kg und 50 kg bei einem Speicherdruck von 350 bar und Reichweiten von etwa 300 km bis 400 km [34].

Es gibt mehrere etablierte Verfahren zur Wasserstoffherstellung, im Zusammenhang mit einer klimafreundlichen Verkehrswende ist für diese Arbeit jedoch ausschließlich Wasserelektrolyse relevant. Bei diesem Prozess wird mittels elektrischer Energie Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Wird Strom aus Erneuerbare-Energie-Anlagen wie beispielsweise Windenergie- oder Photovoltaikanlagen verwendet, handelt es sich um einen klimaneutralen Prozess. Polymerelektrolytmembran- und alkalische Elektrolyse werden von Carmo et al. (2013) [35] und Stolten et. al (2010) [36] beschrieben. Elektrolyse zur Versorgung von HRS kann entweder

## 2. Wasserstoff als Teil der Verkehrswende

zentral oder in unmittelbarer räumlicher Nähe zur HRS stattfinden und wird in letztgenanntem Fall Onsite-Elektrolyse genannt. Andernfalls ist ein Transport des produzierten Wasserstoffs zur HRS erforderlich, der entweder gasförmig beziehungsweise flüssig per LKW oder mittels Pipeline erfolgen kann. Je nach zu transportierendem Massenstrom und Transportdistanz können unterschiedliche Optionen vorteilhaft sein [37]. Insbesondere in einer frühen Phase des Infrastrukturaufbaus mit geringer Wasserstoffnachfrage ist Onsite-Elektrolyse vorteilhaft [38], [39] und wird deshalb in dieser Arbeit als einzige Wasserstoffbereitstellungsoption berücksichtigt.

### 2.2.2. Wasserstofftankstellen und ihre Komponenten

Da Reichweite und Tankdauer eines FCEV mit denen eines konventionellen Fahrzeugs vergleichbar sind, ist es naheliegend, konventionelle Tankstellen als Orte zum Tanken von Wasserstoff zu verwenden und ihr Kraftstoffangebot um Wasserstoff zu erweitern. Dazu sind neben einem Elektrolyseur zur Wasserstoffproduktion mehrere Komponenten erforderlich. So wird der vom Elektrolyseur produzierte Wasserstoff üblicherweise in einem Niederdruckspeicher (NDS) bei bis zu 50 bar gelagert. Je nach Ausgangsdruckniveau des Elektrolyseurs ist dazu gegebenenfalls noch ein Wasserstoffverdichter erforderlich, der das Druckniveau entsprechend anhebt. In jedem Fall ist ein Hochdruckverdichter erforderlich, um Wasserstoff aus dem NDS oder Elektrolyseur auf bis zu 1000 bar zu verdichten. Von diesem Druckniveau kann ein Fahrzeug mittels Überströmen betankt werden. Um eine hohe Betankungsgeschwindigkeit zu gewährleisten, muss der Wasserstoff unmittelbar vor der Zapfsäule gekühlt werden, da andernfalls bei der Verdichtung des Fahrzeugtankinhalts zu hohe Temperaturen entstehen. Verdichtung und Vorkühlung erfordern elektrische Energie. Werden mehrere Hochdruckspeicherbänke kaskadiert verwendet, kann der Energieverbrauch für die Verdichtung und Vorkühlung verringert werden [40], [41]. Neben dieser HRS-Topologie gibt es auch andere Optionen, die zusammen mit verschiedenen Produktions- und Anlieferpfaden in Abbildung 2.2 gezeigt, in dieser Arbeit aber nicht betrachtet werden. FCEB benötigen eine eigene Zapfsäule, erfordern jedoch keine Vorkühlung. Der Betankungsvorgang von FCEV (PKW) ist in der Norm SAE J2601-1 [42], der für FCEB in der Norm SAE J2601-2 [43] geregelt. Um möglichst geringe Wasserstoffgestehungskosten zu erreichen, müssen HRS ausreichend ausgelastet sein, was mit dem gegenwärtig geringen Bestand an FCEV nicht möglich ist. Flottenfahrzeuge hingegen können geeignet sein, die Auslastung der HRS zu erhöhen, zumal sie kein flächendeckendes HRS-Netzwerk erfordern (siehe Kapitel 4). Die richtige Dimensionierung einer HRS für die jeweils gegebenen Anforderungen ist wichtig und hat großen Einfluss auf die Wasserstoffgestehungskosten. Diese Fragestellung wird in Kapitel 5 dieser Arbeit behandelt.

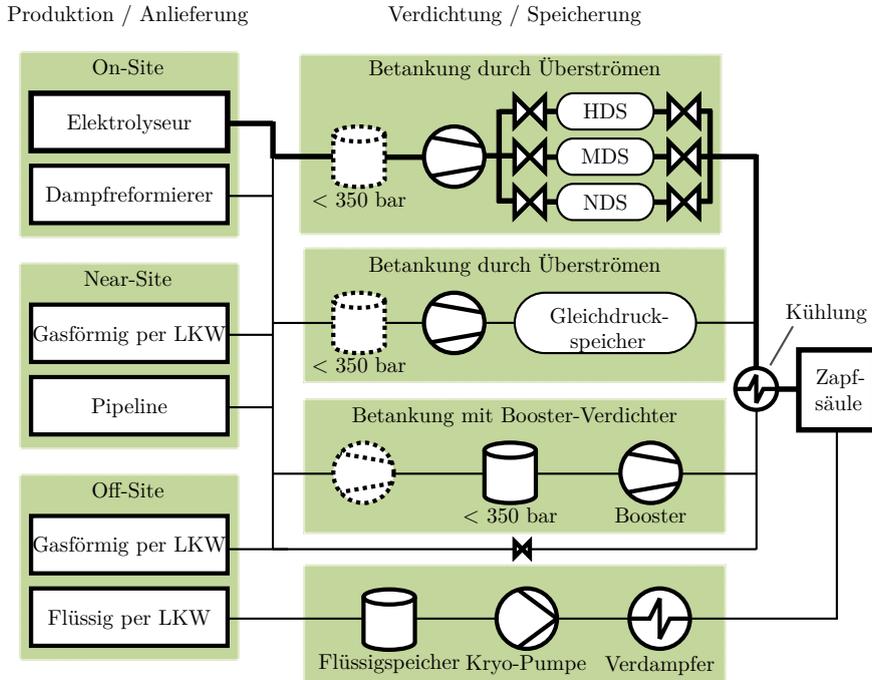
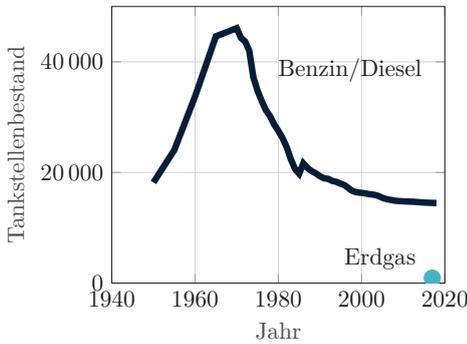


Abbildung 2.2.: Mögliche Tankstellenkonfigurationen. Optionale Komponenten sind gestrichelt dargestellt. Hochdruck- (HDS), Mitteldruck- (MDS) und Niederdruckspeicher (NDS) sind abgekürzt. Die in dieser Arbeit verwendete Konfiguration ist mit größerer Strichstärke gekennzeichnet. Abbildung in Anlehnung an [44]

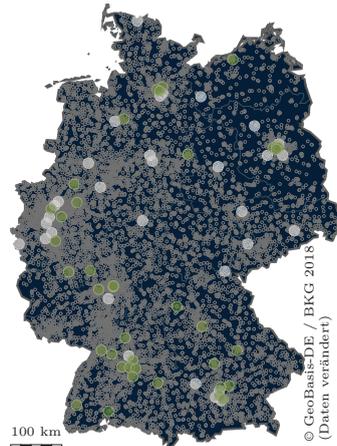
### 2.2.3. Bestand und Ausbauplan von Wasserstofftankstellen

Nachdem es einen starken Anstieg der Zahl an konventionellen Tankstellen in Deutschland zwischen 1950 und 1970 gab, ist der Bestand seitdem rückläufig (siehe Abbildung 2.3a) [45]. Seit etwa 1998 hat sich der Rückgang verlangsamt. Gegenwärtig gibt es in Deutschland etwa 14 500 konventionelle Tankstellen, wovon etwa 900 Erdgas anbieten [46]. Bei Erdgas handelt es sich ebenso wie bei Wasserstoff um einen gasförmigen Kraftstoff, der in Drucktanks im Fahrzeug mitgeführt werden kann. Im Gegensatz zu Wasserstofffahrzeugen sind Erdgasfahrzeuge jedoch in der Regel bivalent und können so alternativ auch Benzin als Kraftstoff nutzen.

Der großskalige Aufbau von HRS hat erst vor einigen Jahren begonnen, seit das Unternehmen H2 Mobility im Jahr 2015 von Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell und Total gegründet wurde. H2 Mobility hat das Ziel, bis Mitte der 2020er Jahre ein Netzwerk von bis zu 400 HRS zu errichten. Dabei sollen die ersten 100 HRS unabhängig vom Fahrzeugbestand aufgebaut werden und die übrigen schrittweise unter der Voraussetzung eines wachsenden Bestands an FCEV. Im Dezember 2017 waren 39 HRS in Betrieb und weitere 32 in Planung (siehe Abbildung 2.3b). Zusätzlich bestehen nicht-öffentliche HRS, zum Beispiel auf Busbetriebshöfen. Die große Diskrepanz zwischen der Anzahl konventioneller Tankstellen und der geplanten Anzahl an HRS lässt vermuten, dass das geplante HRS-Netzwerk deutlich zu klein ist, um Wasserstoff als Teil der Verkehrswende zu etablieren. Tatsächlich ist jedoch unklar, welche Anforderungen an die räumliche Verteilung und den Umfang eines HRS-Netzwerks bestehen. Diese Frage wird im Hinblick auf bestehende Untersuchungen in Kapitel 3.1 beleuchtet und soll im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden (siehe Kapitel 6). Es ist jedoch absehbar, dass die zu errichtenden HRS in dieser Initialphase mit geringem Bestand an FCEV nicht ausgelastet sein werden und ihr Betrieb daher unwirtschaftlich sein wird. Dies stellt ein Hemmnis für den weiteren Ausbau des HRS-Netzwerks dar und verringert die wirtschaftliche Resilienz des Netzwerks gegenüber einem verzögerten Markthochlauf von FCEV. Der Einsatz von Flottenfahrzeugen als planbare Nachfrager mit nur lokalem Infrastrukturbedarf kann dieses Problem abschwächen. In welchem Maße dies möglich ist und welches Potential ein solcher Ansatz bezogen auf das HRS-Gesamtnetzwerk bietet, wird im Rahmen dieser Arbeit (siehe Kapitel 5 und 6) untersucht.



(a) Entwicklung des Bestands konventioneller Tankstellen [45], [46]



(b) Konventionelle Tankstellen (grau) und bestehende / geplante HRS (weiß / grün) [7], [47]

Abbildung 2.3.: Entwicklung und Bestand konventioneller Tankstellen (links) sowie Position dieser und HRS (rechts)

## 2.3. Zusammenfassung von Kapitel 2

In diesem Kapitel wurde ein Überblick über die Rolle von Wasserstoff als Kraftstoff in der Verkehrswende sowie wichtige Aspekte von Wasserstoffinfrastruktur gegeben, der wie folgt zusammengefasst werden kann:

- Der heutige Straßenverkehr geht mit schwerwiegenden Problemen, wie Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen einher. Deshalb ist ein weitreichender Wandel erforderlich, der als Verkehrswende bezeichnet wird.
- Zum Gelingen der Verkehrswende sind unterschiedliche Maßnahmen erforderlich, die in die Kategorien „Mobilitätswende“ und „Energiewende im Verkehr“ unterteilt werden können.
- Die Etablierung von Wasserstoff als Kraftstoff ist eine wichtige Maßnahme zur Energiewende im Verkehr. Sie erfordert neben einem Markthochlauf von FCEV unter anderem den Aufbau eines Wasserstofftankstellennetzwerks und eine Wasserstoffproduktion.
- Aktuell sind nur wenige hundert FCEV in Deutschland zugelassen, weshalb die Auslastung der HRS zu gering ist, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen.

## 2. Wasserstoff als Teil der Verkehrswende

- Der Einsatz von Flottenfahrzeugen kann die Auslastung erhöhen.
- Als Möglichkeit der Wasserstoffherstellung wird in dieser Arbeit ausschließlich Onsite-Elektrolyse an den HRS betrachtet. Weitere betrachtete HRS-Komponenten sind Wasserstoffspeicher, -verdichter -kühler und -zapfsäule.
- Im Dezember 2017 waren 39 HRS in Betrieb und weitere 32 in Planung, während es etwa 14 500 konventionelle Tankstellen gibt. Das HRS-Netzwerk soll in einem ersten Schritt auf 100 und mit zunehmendem Fahrzeugbestand auf bis zu 400 HRS zur Mitte der 2020er Jahre erweitert werden.
- Es ist unklar, welchen Umfang ein HRS-Netzwerk erreichen muss, damit Wasserstoff als Kraftstoff etabliert werden kann.

## **3. Literaturanalyse und vorangegangene Arbeiten**

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung zu verschiedenen Aspekten dieser Arbeit dargestellt und diskutiert. Zunächst werden bestehende Untersuchungen zum Thema dieser Arbeit vorgestellt und mit den Forschungsfragen und der Ausrichtung dieser Arbeit verglichen (siehe Kapitel 3.1). Im nächsten Schritt wird herausgestellt, welche Ansätze zur Modellierung verschiedener Wasserstoffnachfrager bestehen (siehe Kapitel 3.2). Diese sind relevant für die in Kapitel 4 durchgeführte Modellierung. Anschließend erfolgt eine Literaturanalyse zur Auslegung und zum Betrieb von Wasserstoffsystemen, zu denen auch Wasserstofftankstellen zählen (siehe Kapitel 3.3). Diese ist relevant für die in Kapitel 5 beschriebene und angewendete Methodik zur Auslegung von HRS. Für diese Arbeit von entscheidender Bedeutung ist die Bewertung von HRS-Netzwerken hinsichtlich ihres Nutzens für private PKW-Fahrer. Deshalb wird in Kapitel 3.4 ein ausführlicher Überblick über bestehende Untersuchungen und empirische Erkenntnisse sowie Methoden gegeben, während darauf aufbauend in Kapitel 6 eine eigene Methodik entwickelt und angewendet wird. Abschließend werden die in dieser Arbeit verwendeten Simulationsframeworks und -modelle sowie Optimierungsverfahren in Kapitel 3.5 vorgestellt. Diese finden Anwendung in den Kapiteln 5 und 6.

### **3.1. Initialphase des Infrastrukturaufbaus**

Wasserstoff kann nur dann als Kraftstoff etabliert werden, wenn die Tankinfrastruktur, also die Anzahl der HRS und ihre geographische Verteilung, den Anforderungen der Fahrzeugnutzer genügt. In diesem Kapitel werden bestehende Untersuchungen zu dieser Fragestellung vorgestellt und diskutiert. In Kapitel 3.1.1 wird zunächst dargestellt, welche Entwürfe für einen langfristigen Infrastrukturaufbau bestehen. Im Anschluss wird in Kapitel 3.1.2 analysiert, welche Untersuchungen und Erkenntnisse zur Frage der mindestens erforderlichen HRS-Infrastruktur vorhanden sind. In Kapitel 3.1.3 werden dann bestehende Ansätze für einen schrittweisen Aufbau eines HRS-Netzwerks vorgestellt.

### 3.1.1. Infrastruktur für hohe Marktdurchdringungen von FCEV

In verschiedenen Arbeiten wurde bereits untersucht und beschrieben, wie Wasserstoffinfrastruktur für einen auf FCEV umgestellten Straßenverkehr aussehen sollte. Im Folgenden wird ein Überblick über eine Auswahl dieser Arbeiten gegeben.

Melaina et al. (2008) [48] schätzen ab, wie viele HRS in den USA erforderlich wären, um eine HRS-Verfügbarkeit für die Fahrzeugnutzer zu erreichen, die dem bestehenden, konventionellen System entspricht. Dazu werden die Anzahl der konventionellen Tankstellen und die Tankstellendichte für verschiedene Städte in den USA ermittelt. Es wird zwischen urbanen und ländlichen Tankstellen unterschieden. Die Kennwerte jeder Stadt werden miteinander verglichen und es wird die Annahme getroffen, dass auch die geringste vorhandene Tankstellendichte den Ansprüchen der Fahrzeugnutzer genügt. Dann wird dieser niedrigste Wert auf alle Gebiete übertragen und so die erforderliche Anzahl an HRS abgeleitet.

Seydel (2008) [49] präsentiert eine Methodik zur geographisch aufgelösten Betrachtung und Optimierung einer Wasserstoffinfrastruktur für Deutschland. Lokaler Wasserstoffbedarf wird simuliert und eine dazu passende Infrastruktur ausgelegt. Es werden verschiedene Produktions- und Transportpfade für Wasserstoff betrachtet. Die Untersuchung schließt Wasserstoffproduktion aus Kohlevergasung sowie Wasserstoffverbrennungsmotoren ein, Technologien, die gegenwärtig nicht weiterverfolgt werden.

Die Studie GermanHy [50] zeichnet eine Roadmap einer möglichen Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland bis zum Jahr 2050. Fokus der Betrachtung sind PKW, leichte Nutzfahrzeuge und Busse. Dabei werden verschiedene Wasserstoffquellen und Transport- sowie Verteiloptionen berücksichtigt. Den Szenarien liegt eine Abschätzung der Wasserstoffnachfrage zugrunde, die für die Infrastrukturentwicklung vorausgesetzt wird.

Krieg (2012) [51] entwirft ein Pipelinesystem zur Versorgung des Straßenverkehrs in Deutschland mit Wasserstoff. Dies beinhaltet die Auslegung und Bewertung der Pipeline- und Tankstelleninfrastruktur für das Jahr 2050 samt entsprechender Wasserstoffherzeugung. Neben Elektrolyse wird Wasserstoff aus Braunkohlevergasung als mögliche Wasserstoffquelle betrachtet. Die zugrundeliegende Wasserstoffnachfrage basiert auf der Studie GermanHy und wird mit etwa 10 000 HRS bedient.

Robinius (2015) [52] konzipiert ein Marktdesign für den Strom- und Gassektor zur Versorgung des Straßenverkehrs in Deutschland mit Wasserstoff. Dabei werden Szenarien mit hohen Anteilen erneuerbarer Energie zugrunde gelegt und eine Wasserstoffnachfrage angenommen. Auf Basis der entwickelten Modelle wird ein geographisch aufgelöstes Energiesystemmodell aufgebaut. Die benötigten Erzeugungskapazitäten verschiedener Erneuerbare-Energie-Anlagen werden ebenso bestimmt und verortet

wie ein Pipelinesystem bestehend aus Transmissions- und Distributionsnetz. Für dieses System werden Kosten- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mit einer Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Es wird ein Tankstellennetzwerk von knapp 10 000 HRS angenommen.

Hartmann (2017) [53] wählt einen zu [48] ähnlichen Ansatz und wendet diesen auf Deutschland an. Dabei wird das bestehende Netzwerk an konventionellen Tankstellen zum Maßstab für ein zukünftiges HRS-Netzwerk herangezogen. Für sechs unterschiedliche Gebietstypen, klassifiziert nach Einwohnerzahl, werden Kennwerte wie Bevölkerungs- und Tankstellendichte ermittelt. Insgesamt ergeben sich über 2300 Gebiete. Für jeden Gebietstyp wird die minimale Tankstellendichte bestimmt und auf alle Gebiete des gleichen Typs übertragen. Daraus ergibt sich die Anzahl an HRS, die erforderlich wären, um ein Netzwerk zu bilden, das den Ansprüchen des heutigen Fahrers konventioneller PKW genügt. Für Deutschland wären demnach knapp 8000 HRS erforderlich.

Robinius et al. (2018) [30] vergleichen die erforderliche Infrastruktur für BEV und FCEV für verschiedene Marktdurchdringungen dieser Fahrzeugtypen. Die Analyse umfasst dabei das Energiesystem Deutschlands und ermittelt neben Kosten auch die zu erwartenden spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der beiden Konzepte. Der Markthochlauf der jeweiligen Fahrzeugtypen ist Randbedingung für die jeweilig auszulegende Infrastruktur. Es werden 400 HRS für ein Szenario mit 0,1 Mio. FCEV angenommen, 1000 HRS für 1 Mio. FCEV und 7000 HRS für 20 Mio. FCEV vorgesehen.

Alle genannten Arbeiten betrachten die Wasserstoffnachfrage als exogene Größe und setzen sie voraus, um die zu ihrer Deckung erforderliche Infrastruktur zu bestimmen. Während nur wenige Untersuchungen verschiedene Phasen des Markthochlaufs unterscheiden, fokussieren sich die meisten auf ein Szenario vollständigen Infrastrukturaufbaus, das zum Beispiel für das Jahr 2050 angenommen wird. Die Anzahl der ermittelten Wasserstofftankstellen hängt dabei von der erforderlichen Kapazität, also durchschnittlich pro Tag abzugebender Wasserstoffmasse, ab. Tatsächlich erfüllt ein HRS-Netzwerk neben der Kapazität zur Versorgung einer PKW-Flotte noch eine zweite Funktion. Diese besteht in der Flächenabdeckung, welche insbesondere in der Initialphase des Aufbaus eines HRS-Netzwerks von großer Bedeutung ist. Denn legt man das heutige System konventioneller Tankstellen zugrunde, so erwartet ein Fahrer eines FCEV, mindestens überall in Deutschland sein FCEV auftanken zu können. Durch den geringen FCEV-Bestand wäre hinsichtlich der Kapazität eine geringe Zahl an HRS ausreichend, eine angemessene Flächenabdeckung würde jedoch deutlich mehr HRS erfordern. Ein flächendeckendes HRS-Netzwerk von beispielsweise 10 000 HRS zu errichten, bevor es einen nennenswerten Bestand an FCEV gibt, ist allerdings mit großen Hürden und Risiken verbunden, die gegenwärtig offenbar kein Stakeholder bereit ist zu tragen. Deshalb ist ungeklärt, wie das HRS-Netzwerk zu Beginn aussehen sollte und wie viele HRS nötig sind, um ein ausreichend dichtes Netzwerk zu knüpfen. Insbesondere ist offen, wie ein gleichzeitiger, schrittweiser Aufbau des Netzwerks und des Fahrzeugbestands gelingen kann.

### 3.1.2. Mindestinfrastruktur für einen Markthochlauf von FCEV

Im Folgenden werden Untersuchungen zur Schätzung einer Mindestanzahl an HRS sowie zur Wechselwirkung zwischen dem Markthochlauf von FCEV und dem Aufbau von Infrastruktur vorgestellt.

Melaina et al. (2003) [54] wenden drei Ansätze an, um eine Mindestanzahl an HRS zu ermitteln. Dabei wird zwischen zwei Phasen unterschieden. In der ersten Phase soll das HRS-Netzwerk Erstanwendern mit geringeren Ansprüchen genügen, während in der zweiten Phase einem größeren Teil der Bevölkerung in Metropolen der Umstieg auf ein FCEV ermöglicht werden soll. Gemäß dem ersten Ansatz bestimmt ein prozentualer Anteil der konventionellen Tankstellen, wie viele HRS erforderlich sind. Gestützt auf andere Studien wird von 5 % für die erste und 15 % für die zweite Phase ausgegangen. Der zweite Ansatz sieht vor, dass alle Menschen in Metropolen höchstens eine bestimmte Distanz von einer HRS entfernt sein sollen. In der ersten Phase werden 8 km, in der zweiten Phase 5 km gewählt, entsprechend 17 beziehungsweise 10 Minuten Fahrtdauer. Die dazu erforderliche Anzahl an HRS entspricht 1 % beziehungsweise 2,6 % aller Tankstellen. Der dritte Ansatz fokussiert sich auf die Hauptverkehrsstraßen und erfordert entlang dieser maximale Abstände zwischen HRS, die nicht überschritten werden dürfen. In der ersten Phase werden 80 km für rurale und 32 km für urbane Gebiete angenommen, in der zweiten Phase 32 km beziehungsweise 16 km. Daraus ergeben sich Anteile von 5 % beziehungsweise 10 % der Tankstellen. Aus einem Vergleich der drei Ansätze schließen die Autoren, dass in Stadtgebieten von einer Überversorgung mit Tankstellen auszugehen ist, da nur der erste Ansatz hier zu erheblich höheren Tankstellendichten führt. Übertragen auf Deutschland würden die Ergebnisse ein Netzwerk mit 145 bis 2200 HRS erfordern.

Nicholas et al. (2005) [55] schätzen die mindestens erforderliche Infrastruktur auf Basis eines Fahrtdauer-Ansatzes für ein Gebiet in den USA ab. Dabei wird zwischen urbanen und ruralen Gebieten unterschieden und ermittelt, wie lange Einwohner eines Gebiets durchschnittlich bis zur nächsten Tankstelle fahren müssen. Die Autoren stellen signifikante Unterschiede zwischen ländlichen und städtischen Gebieten fest. So muss ein deutlich größerer Anteil der ländlichen Tankstellen Wasserstoff anbieten als die in städtischen Gebieten, um eine vergleichbare Fahrtzeit zu gewährleisten. Soll beispielsweise eine höchstens 11 % längere Fahrtdauer gewährleistet sein, so müssen 30 % der urbanen und 57 % der ruralen Tankstellen Wasserstoff anbieten. Je nachdem, welche Tankstellen man in Deutschland als ländlich oder urban klassifiziert, würde dies zwischen 4400 und 8300 HRS bedeuten. Die Autoren stellen jedoch heraus, dass das Maß der Fahrtdauer nur geeignet ist, erste Hinweise zu geben, da unklar ist, ob es die Anforderungen der Fahrer tatsächlich gut genug widerspiegelt.

Keles et al. (2008) [56] betrachten die Umstellung des Straßenverkehrs auf FCEV in Deutschland aus wirtschaftlicher Sicht mittels eines agentenbasierten Ansatzes. Dabei werden sowohl die Fahrzeugkäufer, die Fahrzeughersteller als auch die Tankstellenbetreiber als eigener Agententyp betrachtet. Das Produktions- und Kaufverhalten

wird in Abhängigkeit verschiedener Kriterien, zum Beispiel Kauf- oder Kraftstoffpreis, modelliert. Die Autoren untersuchen für verschiedene Szenarien, ob und wann ein Markthochlauf der FCEV und der Aufbau eines HRS-Netzwerks gelingen kann. Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich des Initial-HRS-Netzwerks, der Kaufprämien für FCEV und einer Steuerreduktion auf Wasserstoff als Kraftstoff. Die Ergebnisse legen nahe, dass ein ausreichend großes Initialnetzwerk entscheidend für Erfolg und Markthochlauf der FCEV ist. So kann gemäß der durchgeführten Simulation ein Netzwerk von 50 HRS nicht genügen. Während diese Analyse gegebenenfalls qualitative Indikationen geben kann, ist sie stark abhängig von den zahlreichen getroffenen Annahmen und Parametern. Das Agentenverhalten kann in einem solchen Ansatz zudem nur bedingt die Wirklichkeit abbilden, sodass die Aussagekraft der Ergebnisse eingeschränkt ist.

Huétink et al. (2010) [57] verfolgen einen agentenbasierten Ansatz zur Untersuchung des gemeinsamen Wachstums von Tankstellenbestand und FCEV in den Niederlanden. Sie bewerten den Einfluss von HRS-Platzierungsstrategien (im gesamten Gebiet oder nur urban), Initialinfrastruktur (2 % bis 32 % der konventionellen Tankstellen) und sozialen Netzwerken auf die Marktdurchdringung nach dem Simulationszeitraum. Dabei wird auch die geographische Ausdehnung des Netzwerks berücksichtigt, indem eine Modellumgebung, bestehend aus 400 mal 400 Zellen, davon 200 mal 200 urban, zugrunde gelegt wird. Fahrzeug- und Tankstellenbetreiber sind als Agenten abgebildet. In jedem Simulationszeitschritt (die Schrittweite beträgt ein Jahr) entscheidet jeder Fahrzeug- und jeder Tankstellenbetreiber, ob er ein FCEV kauft beziehungsweise seine Tankstelle um Wasserstoff als Kraftstoff erweitert. Es werden zahlreiche Kriterien angelegt und die Entscheidungen beeinflussen sich gegenseitig. So steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrer auf FCEV umsteigt, wenn es viele HRS in seiner Umgebung gibt. Die Ergebnisse zeigen, dass zu wenig Initialinfrastruktur den Markthochlauf verhindert und mindestens 8 % der Tankstellen als Initialinfrastruktur benötigt werden. Dies entspricht in Deutschland einem Netzwerk aus 1200 HRS. Diese Ergebnisse haben jedoch einen qualitativen Charakter, da das Modell nur begrenzt Praxisbezug aufweist und viele entscheidende Parameter mittels Annahmen festgelegt werden.

Miyagawa (2013) [58] präsentiert ein Modell zur Bestimmung der nötigen Tankstellendichte. Das zugrunde gelegte Maß ist die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Fahrzeug von einem Start- zu einem Zielort und zurück fahren kann, wobei diese Orte im Modell zufällig gewählt werden. Die Untersuchungen werden in einem Modell durchgeführt, in dem HRS regelmäßig und zufällig verteilt werden. Die Bewertung der Erfolgswahrscheinlichkeit von Fahrten erfolgt dann geometrisch und analytisch für drei Szenarien, die sich hinsichtlich der Verfügbarkeit von Tankstellen am Start- und Zielort unterscheiden. Die ermittelten Erfolgswahrscheinlichkeiten und erforderlichen Tankstellendichten lassen sich nur schwer in die Praxis übertragen, da der Ansatz sehr viele Vereinfachungen und Abstraktionen beinhaltet. Gleichwohl ist ein Ergebnis der Untersuchung, dass der Einfluss der Kraftstoffverfügbarkeit am Start- und Zielort großen Einfluss auf die Erfolgswahrscheinlichkeit von Fahrten hat.

### 3. Literaturanalyse und vorangegangene Arbeiten

Einige der präsentierten Arbeiten weisen eine Mindestanzahl an HRS aus, die gemäß den jeweiligen Ansätzen für einen Markthochlauf erforderlich sind. Allerdings bilden die zugrunde gelegten Kriterien die Anforderungen an eine Mindestinfrastruktur nur indirekt und vage ab. Somit bleibt unklar, ob eine solche Infrastruktur tatsächlich den prognostizierten Effekt hätte. Darüber hinaus werden keine Lösungen vorgeschlagen, mit denen der Aufbau einer solchen, zunächst unwirtschaftlichen, Initialinfrastruktur erreicht werden kann.

#### 3.1.3. Ansätze für einen schrittweisen Aufbau von Infrastruktur in der Initialphase

Das Problem der Initialphase des HRS-Aufbaus besteht, wie beschrieben, darin, dass schon erste FCEV ein flächendeckendes HRS-Netzwerk erfordern, das bei derart geringer Wasserstoffnachfrage jedoch nicht wirtschaftlich zu betreiben wäre. Ideal wäre es, wenn ein Weg gefunden würde, mit dem ein schrittweiser Aufbau von HRS ermöglicht wird. In der Literatur finden sich zwei Ansätze, um das Problem zu adressieren: Der Cluster-Ansatz und der Einsatz von Flottenfahrzeugen.

##### Cluster-Ansatz

Der Cluster-Ansatz basiert auf einer räumlichen Beschränkung des HRS-Netzwerks. Dabei werden HRS nur in ausgewählten Regionen errichtet, sodass sich für die dort lebenden Menschen eine lokal ausreichende Infrastruktur ergeben soll. Gegebenenfalls können diese Regionen durch einzelne Verbindungs-HRS verknüpft werden [59]. Dieser Ansatz wird in verschiedenen Untersuchungen beschrieben und simulativ angewendet, die im Folgenden vorgestellt werden.

Ogden et al. (2011) [60] sehen die gleichzeitige Einführung von FCEV und HRS in ausgewählten Gebieten in Kalifornien, USA vor. Es werden Szenarien untersucht, die sich unter anderem hinsichtlich der HRS-Anzahl und deren geographischer Verteilung beziehungsweise Konzentration unterscheiden. Die Gebiete möglicher Cluster werden anhand einer Experteneinschätzung ausgewählt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Konzentration von HRS in Clustern eine geringere Gesamtzahl an HRS erfordert, um Erstanwender zu bedienen. Dabei werden zwischen vier und zwölf Cluster für die untersuchte Region vorgeschlagen. Gegebenenfalls werden sogenannte Verbindungs-HRS zwischen zwei oder mehreren Clustern als sinnvoll angesehen. Eine Wirtschaftlichkeit kann jedoch erst in einer der folgenden Ausbaustufen erreicht werden, wenn Größe und Auslastung der HRS steigen. Diese Arbeit setzt voraus, dass FCEV-Fahrer sich mit einer lokal begrenzten HRS-Infrastruktur zufriedengeben. Dieser Aspekt wird nicht weiter diskutiert.

Stephens-Romero et al. (2011) [39] betrachten ebenfalls Kalifornien zum Aufbau von HRS-Clustern. Dabei werden drei Regionen ausgewählt und für drei Ausbaustufen die Anzahl und Positionierung von HRS ermittelt. Einwohner gelten demnach als

erschlossen, wenn sie innerhalb einer gewissen Fahrdistanz zu einer HRS leben. Die Ergebnisse zeigen, dass mit 11 % bis 14 % der bestehenden Tankstellen eine vergleichbare Abdeckung in den betrachteten Gebieten erreicht werden kann. Auch diese Arbeit geht von einem wachsenden FCEV-Bestand aus und setzt voraus, dass eine HRS in der Nähe des Wohnorts für den Umstieg auf ein FCEV ausreicht.

Brey et al. (2014) [61] beschreiben eine sequentielle Roll-Out-Strategie für HRS in Andalusien, Spanien. Dazu werden 770 Gebiete auf Basis von Kriterien wie Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien, Länge des Straßennetzes und Pro-Kopf-Einkommen klassifiziert und sortiert. Es werden mehrere Schritte des Infrastrukturaufbaus betrachtet, mit denen jeweils ein gewisser Bevölkerungsanteil mit HRS versorgt werden soll. Dann werden aus der Liste der Gebiete so lange Gebiete ausgewählt, bis die geforderte Bevölkerungszahl erreicht ist. Diese Gebiete bilden Cluster und werden, falls erforderlich, mit Verbindungs-HRS verknüpft. Dann wird für jedes Gebiet die Anzahl der erforderlichen HRS bestimmt, wobei dies auf Basis der Kapazität und nicht der räumlichen Abdeckung erfolgt. Auf diese Weise ergibt sich ein schrittweiser Ausbau des HRS-Netzwerks. Allerdings bleibt auch in dieser Untersuchung offen, in welchem Maße diese räumlich beschränkte Infrastruktur den Anforderungen der PKW-Fahrer genügen kann.

Die vorgestellten Arbeiten entwerfen zwar Methoden zur Ausgestaltung einer Clusterstrategie und eines schrittweisen Roll-Outs von HRS. Allerdings wird die entscheidende Frage, die dieser Ansatz aufwirft, nicht beantwortet: Kann eine derart räumlich beschränkte HRS-Infrastruktur den Anforderungen der Autofahrer an eine Tankinfrastruktur genügen?

#### **Einsatz von Flottenfahrzeugen**

Wird eine HRS-Infrastruktur für Flottenfahrzeuge, wie Stadtbusse (im Folgenden als Busse bezeichnet) oder Taxis, aufgebaut, entfällt die Anforderung einer Flächendeckung weitestgehend. Denn beispielsweise Busse benötigen eine Tankstelle nur in der Stadt, in der sie eingesetzt werden. Typischerweise genügt bereits eine HRS in der Nähe des Busdepots. Andere Flottentypen benötigen gegebenenfalls eine ausgedehntere Infrastruktur, jedoch ist auch diese auf das Einsatzgebiet der Fahrzeuge beschränkt. Derartige Flottenfahrzeuge können die jeweiligen HRS entsprechend auslasten und so deren Wirtschaftlichkeit in der Initialphase verbessern.

Deshalb wird von Melendez et al. (2005) [62] vorgeschlagen, erste HRS an Bundesbehörden zu installieren, damit die HRS durch die Behördenfahrzeuge ausgelastet werden können. Shayegan et al. (2009) [38] untersuchen den Einsatz von Wasserstoffbussen in London als geeignete erste Wasserstoffnachfrager. Auch von Keles et al. (2008) [56] werden Busse und Taxis als Beispiele für geeignete Ersthochfrager genannt. Melo et al. (2014) [63] nennen neben Bussen und Taxis Fahrzeuge der Post und behördliche Fahrzeuge als erste Wasserstoffnachfrager. Robinius et al. (2018)

### 3. Literaturanalyse und vorangegangene Arbeiten

[30] weisen ebenfalls darauf hin, dass eine Herausforderung in der Initialphase darin besteht, die HRS auszulasten und schlagen neben Bussen auch Lastkraftwagen oder Schienenfahrzeuge als erste Nachfrager vor. Nur wenige dieser Arbeiten gehen diesbezüglich über eine bloße Erwähnung von Flotten als mögliche erste Nachfrager hinaus und betrachten einzelne Anwendungsfälle. Eine Roll-Out-Strategie für HRS in Kombination mit Flotten wird nicht betrachtet.

Melaina et al. (2008) [48] betrachten den Ansatz, Flottenfahrzeuge einzusetzen hingegen kritisch, da Tankstellen für einige Flottenfahrzeuge, wie beispielsweise Busse, in der Regel nicht öffentlich sind und somit nicht als Infrastruktur für private Fahrer dienen können. Darüber hinaus wird angeführt, dass andere Flottenfahrzeuge weit verteilte öffentliche Infrastruktur nutzen und einzelne, zentrale HRS deren Anforderungen nicht genügen können. Über diese Kritik der Autoren hinaus ist anzumerken, dass rein lokale Infrastruktur zwar gegebenenfalls dem Betrieb von Flottenfahrzeugen gerecht werden, aber der Wiederverkauf der Fahrzeuge schwierig sein kann, wenn andere Städte Wasserstoff als Kraftstoff nicht vorsehen. Dieser Aspekt kann eine Hürde für die Anschaffung von FCEV sein, selbst wenn die Infrastruktur lokal ausreicht. Zudem ist die Tankinfrastruktur für Busse in der Regel nur teilweise kompatibel zu PKW, da das Druckniveau der Wasserstoffspeicher bei Bussen meist 350 bar beträgt, während PKW 700 bar Tankdruck aufweisen. In Kapitel 4.2.2 wird dieser Aspekt diskutiert.

#### 3.1.4. Zusammenfassung von Kapitel 3.1

Die Literaturanalyse zur Initialinfrastruktur ergab folgende Erkenntnisse:

- Es bestehen Entwürfe davon, wie eine HRS-Infrastruktur zur Versorgung des Straßenverkehrs in Deutschland langfristig aussehen sollte.
- Diese Ansätze sehen jedoch die Wasserstoffnachfrage als exogen an und verwenden sie als Randbedingung. Das HRS-Netzwerk wird aus Kapazitätssicht ausgelegt und nicht hinsichtlich einer Flächendeckung betrachtet. Darüber hinaus bleibt offen, wie ein schrittweiser Aufbau des Netzwerks — insbesondere in der Initialphase — gestaltet werden kann.
- In der Initialphase besteht das Problem, dass es nur wenige FCEV gibt, ein Markthochlauf jedoch eine weitestgehend flächendeckende HRS-Infrastruktur erfordert. Die bestehenden FCEV können jedoch auch eine Initialinfrastruktur nicht ausreichend auslasten, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen.
- Verschiedene Arbeiten versuchen sich der Frage einer Mindestinfrastruktur, die einen Markthochlauf von FCEV erst ermöglicht, zu nähern. Diese Ansätze beruhen jedoch auf meist unbegründeten Annahmen hinsichtlich des Kriteriums für

eine ausreichende Infrastruktur und führen so zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Somit wird nicht geklärt, ob eine der vorgeschlagenen Infrastrukturen tatsächlich den prognostizierten Effekt hätte.

- Ansätze für die besonderen Herausforderungen der Initialphase sind die Beschränkung des HRS-Aufbaus auf einige Gebiete (Cluster) und der Einsatz von Flottenfahrzeugen, die keine flächendeckende Infrastruktur erfordern.
- Es bleibt offen, ob die dem Clusteransatz zugrundeliegende geographische Einschränkung des HRS-Netzwerks eine bedeutende Hürde für die private Anschaffung eines FCEV darstellt.

## 3.2. Modellierung von Wasserstoffnachfragern

Für die spätere Simulation der Versorgung von verschiedenen Nachfragertypen mit Wasserstoff als Kraftstoff (siehe Kapitel 5) ist eine modellhafte Abbildung des Nachfrageprofils dieser Nachfragertypen erforderlich. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über bereits bekannte, bestehende Modelle für Busse, Taxis und Carsharing-Fahrzeuge gegeben.

### 3.2.1. Modellierung von Bussen als Wasserstoffnachfrager

Auch wenn FCEB in der Literatur häufig betrachtete Nachfrager von Wasserstoff sind, wird kaum auf Nachfrageprofile eingegangen. Die Umstellung von Busflotten auf FCEB untersuchen Langford et al. (2012) in [64] am Beispiel eines Busbetreibers in den USA mit 93 Fahrzeugen. In der von diesem Betreiber versorgten Stadt leben etwa 180 000 Menschen. Der Busbetrieb und die durch ihn erzeugte Wasserstoffnachfrage werden zwar grundsätzlich betrachtet, zeitlich aufgelöstes Tankverhalten wird jedoch nicht dargestellt. Shayegan et al. (2009) betrachten in [38] Infrastrukturkosten für FCEB in London. Ein Ergebnis ist, dass die Höhe der Wasserstoffnachfrage einen erheblichen Einfluss auf die Wasserstoffgestehungskosten hat. Diese Erkenntnis wird jedoch gewonnen, ohne ein zeitlich aufgelöstes Tankverhalten zu berücksichtigen. Joffe et al. (2004) optimieren in [65] Wasserstoffinfrastruktur für eine hypothetische FCEB-Flotte in London. Dabei wird auch das Einsatzprofil der Busse unterschiedlicher Depots berücksichtigt. Es werden allerdings nur qualitativ Erkenntnisse über die Möglichkeiten der Betankung abgeleitet.

### 3.2.2. Modellierung von Taxis als Wasserstoffnachfrager

In der Literatur werden Taxis häufig im Zusammenhang mit der Einführung von BEV betrachtet. Entsprechend werden für diesen Fall Ladesäulen positioniert und Ladestrategien untersucht und entwickelt. Da BEV ein grundlegend anderes Tankverhalten

### 3. Literaturanalyse und vorangegangene Arbeiten

als FCEV aufweisen, können aus diesen Untersuchungen keine Erkenntnisse oder Ansätze für die Betrachtung von FCEV übernommen werden. Zhang et al. (2015) [66] analysieren konventionelles Tankverhalten für den Taxiverkehr in Peking. Tankvorgänge werden empirisch für über 32 000 Fahrzeuge geografisch und zeitlich zugeordnet. Die Ergebnisse zeigen, dass sich das zeitliche Tankverhalten von Taxis zwischen Wochentagen und Wochenenden in China nicht stark unterscheidet. Die durchschnittliche jährlich zurückgelegte Strecke pro Fahrzeug beträgt über 84 000 km. Für Berlin und Hamburg lassen sich verfügbare Informationen zum Fahrverhalten von Taxis auswerten [67]. Demnach legt jedes Fahrzeug durchschnittlich eine Strecke von etwa 58 000 km pro Jahr zurück und Wochentage und Wochenende weisen unterschiedliches Fahrverhalten auf. Diese Unterschiede legen nahe, dass das Fahrverhalten von Taxis regional unterschiedlich ist und Daten sowie Erkenntnisse aus Untersuchungen in Städten mit einer stark abweichenden Bevölkerungs- oder Siedlungsstruktur nicht für diese Arbeit herangezogen werden können.

#### 3.2.3. Modellierung von Carsharing-Fahrzeugen als Wasserstoffnachfrager

Die Literatur weist nur wenige Analysen von Carsharing auf Basis von Wasserstoff als Kraftstoff auf. Für die Stadt Budapest, Ungarn untersuchen Kriston et al. (2010) in [68] Carsharing mit FCEV hinsichtlich wirtschaftlicher Kriterien. Allerdings werden hier keine üblichen PKW als Fahrzeuge, sondern Leichtfahrzeuge vorgesehen. Es werden unterschiedliche Flottengrößen zwischen 20 und 200 Fahrzeugen bewertet. Der Fokus der Betrachtung liegt auf dem Geschäftsmodell, eine technische Modellierung des Tankverhaltens erfolgt nicht. Die angenommene durchschnittliche Anzahl an Tankvorgängen pro Fahrzeug und Tag liegt je nach Fahrzeug zwischen 1 und 2. Unabhängig davon, wie verlässlich diese Angabe ist, kann sie hier nicht verwendet werden, da ein anderer Fahrzeugtyp mit abweichendem Kraftstoffverbrauch und anderer Tankkapazität zugrunde gelegt wird. Schmöller et al. (2015) [69] analysieren das Fahrverhalten von Free-floating-Carsharing für die Städte München und Berlin im Zeitraum November 2011 bis Oktober 2013. Unter anderem wird die zeitliche Verteilung von Fahrten stundenweise ausgewertet. Weder Wasserstoff als Kraftstoff noch das Tankverhalten sind jedoch Gegenstand der Untersuchung. Lopes et al. (2014) nähern in [70] das Fahrverhalten von Nutzern eines stationsbasierten One-way-Carsharing-Systems mittels agentenbasierter Modellierung an. Das Modell basiert auf einer Erhebung in Lissabon, Portugal zum Mobilitätsverhalten, nutzt aber zusätzlich stochastische Methoden, um Fahrhäufigkeiten variieren zu lassen. Die Fahrzeuge werden in diesem Modell von Mitarbeitern des Carsharing-Betreibers getankt. Das modellierte Fahrverhalten deckt sich nicht mit den empirischen Daten aus [69]. Beispielsweise zeigt das modellierte Verhalten keine Häufung von Fahrten am Abend. Wasserstoff als Kraftstoff sowie die zeitliche Verteilung der Tankvorgänge werden nicht betrachtet.

Die civity Management Consultants GmbH & Co. KG (im Folgenden civity genannt)

### 3.3. Auslegung und Betrieb von Wasserstoffsystemen

erhob Daten zu Carsharing-Fahrzeugen und bereitete diese für unter anderem die vorliegende Arbeit auf. Für den Zeitraum vom 20.08.2016 bis 14.03.2017 wurden für die Flotten von car2go und DriveNow in den Städten Berlin, Düsseldorf, Frankfurt am Main, Hamburg, Köln und München (sofern jeweils vorhanden) für nahezu alle Fahrten folgende Daten erfasst: Abfahrts- und Ankunftszeitpunkt sowie die Tank- und Ladestände zu Beginn und am Ende einer Fahrzeugbuchung. Für alle konventionell angetriebenen Fahrzeuge wurden dann die Buchungen ermittelt, die am Ende der Fahrt einen höheren Tankstand als zu Beginn aufwiesen. Es wurde dann angenommen, dass in der zeitlichen Mitte der jeweiligen Fahrt ein Tankvorgang stattgefunden hat. Für jede Stunde des oben genannten Zeitraums wurde die Anzahl der Tankvorgänge ermittelt. Die sich daraus ergebenden Daten sowie die jeweilige Flottengröße in einer Stadt (monatlich) wurden von civity für diese Arbeit zur Verfügung gestellt [71]. Darüber hinaus wurden für den Zeitraum vom 14.08.2016 bis 15.07.2017 nicht-aggregierte Daten von car2go-Fahrzeugen zu Tankfüllständen zu Beginn und am Ende einer Fahrt bereitgestellt [72].

#### 3.2.4. Zusammenfassung von Kapitel 3.2

Die Literaturanalyse zur Modellierung von Wasserstoffnachfragern ergab folgende Erkenntnisse:

- Busse als Wasserstoffnachfrager wurden zwar in der Literatur betrachtet, allerdings sind keine zeitlich aufgelösten Modelle zum Nachfrageprofil vorhanden.
- Für Taxis bestehen zwar keine Nachfrageprofile, jedoch sind Daten zum zeitlich aufgelösten Fahrtenprofil für Berlin vorhanden. Diese können im Folgenden genutzt werden.
- Für gewerbliches Carsharing bestehen Daten zum Fahrtenprofil für München und Berlin. Diese könnten zur Annäherung des Tankverhaltens genutzt werden. Jedoch wurden für unter anderem die vorliegende Arbeit vom Unternehmen civity detaillierte Daten zu Carsharing-Fahrzeugen in sechs Städten zur Verfügung gestellt und daraus Informationen zum Tankverhalten abgeleitet. Auf diese wird im Folgenden aufgebaut.

### 3.3. Auslegung und Betrieb von Wasserstoffsystemen

In dieser Arbeit werden  $H_2$ -Initialzellen betrachtet, die aus Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse, WEA zur Stromversorgung, einer Wasserstofftankstelle mit Speichern und Verdichtern sowie einer Wasserstoffnachfrage bestehen. Da sich alle Komponenten in räumlicher Nähe befinden können, wird im Folgenden vereinfachend von HRS gesprochen, die über Onsite-Elektrolyse sowie eine WEA-Anbindung verfügen.

### 3. Literaturanalyse und vorangegangene Arbeiten

In diesem Kapitel wird ein Überblick über Literatur zu Auslegung (siehe Kapitel 3.3.1) und Betrieb (siehe Kapitel 3.3.2) vergleichbarer Systeme gegeben.

#### 3.3.1. Auslegung von Wasserstoffsystemen

Unter der Auslegung von Wasserstoffsystemen kann man die Dimensionierung der einzelnen Komponenten eines solchen Systems verstehen. Diese Komponenten bilden somit die Topologie des Systems. Findet die Auslegung mittels eines Optimierungsverfahrens statt, wird von Topologieoptimierung gesprochen. Eine solche Optimierung wird in Kapitel 5 dieser Arbeit durchgeführt. Im Folgenden wird deshalb ein Überblick über bestehende Arbeiten zur Auslegung von HRS gegeben und geprüft, ob Teile davon für diese Arbeit verwendet werden können.

Nistor et al. (2016) [73] betrachten eine HRS mit Onsite-Elektrolyse (270 kW Nennleistung) in Großbritannien mittels Simulation. Dabei werden die beschriebenen Komponenten technisch detailliert simuliert und anschließend einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterzogen, sodass Wasserstoffgestehungskosten, Englisch: Levelized Cost of Hydrogen (LCOH<sub>2</sub>) bestimmt werden können. Als Strombezugsmöglichkeiten werden eine WEA (225 kW Nennleistung) sowie Netzstrombezug vorgesehen. Wasserstoffnachfrage wird mittels stochastischer Methoden modelliert, die sich auf Daten der durchschnittlich zurückgelegten Fahrstrecke sowie zu üblichen Füllständen der Fahrzeugtanks bei Beginn des Tankvorgangs stützen. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt Kapital-, Strom-, Wartungs- und Versicherungskosten der Komponenten sowie Steuern und beruht auf der Annuitätenmethode. Sowohl Polymerelektrolytmembran- als auch alkalische Elektrolyse werden bewertet. Die Ergebnisse der Untersuchung besagen, dass eine reine Windparkanbindung zu einer mittleren Auslastung des Elektrolyseurs von 50 % führt und überdies häufig nicht ausreicht, um den gesamten Wasserstoffbedarf zu decken. Wird zusätzlich Netzstrombezug erlaubt, kann unter den getroffenen Annahmen Wirtschaftlichkeit erreicht werden.

In dieser Studie wird zwar ein detailliertes Modell verwendet und mit einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gekoppelt, allerdings ist sie auf einen Anwendungsfall beschränkt. Es erfolgt keine Anpassung oder Optimierung der Komponentendimensionierung. Zudem wird für die zugrundeliegende Nachfragemodellierung kein realistisches Tankverhalten verwendet.

Zhao et al. (2015) [74] untersuchen eine HRS mit WEA oder Photovoltaikanlagenanbindung sowie Onsite-Elektrolyse mittels Simulation. Zusätzlich wird in ihrem Modell eine stationäre Brennstoffzelle vorgesehen, um bei Bedarf Wasserstoff in Strom wandeln zu können. Ein Bezug von Netzstrom hingegen wird nicht vorgesehen. Das zugrundeliegende Nachfrageprofil entstammt einer bestehenden HRS in Kalifornien, USA. Die Autoren variieren die angenommenen installierten Leistungen der WEA

### 3.3. Auslegung und Betrieb von Wasserstoffsystemen

und der Photovoltaikanlage, um eine möglichst gut zum Bedarf passende Dimensionierung zu erreichen. Anschließend werden geeignete Dimensionierungen von Elektrolyseur und Speicher abgeschätzt. Es wird eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der erzielbaren Volllaststunden der WEA und Photovoltaikanlage durchgeführt. Zusätzlich werden drei Betriebsstrategien verglichen. Ergebnis ist eine für den Bedarf der kalifornischen HRS passende Dimensionierung und eine Empfehlung für eine der drei Betriebsstrategien.

Obwohl die Autoren die Topologie des Systems anpassen, handelt es sich nicht um eine vollständige Topologieoptimierung. Die Kosten der Anlage werden geschätzt, sind aber nicht Ziel einer Optimierung, die die Dimensionierung aller Komponenten gleichzeitig verändert. Es wird zudem nicht untersucht, welchen Einfluss die Nutzung eines Netzanschlusses auf die optimale Auslegung, die Kosten und die Versorgungssicherheit hätte.

Li et al. (2017) [75] stellen eine Methodik zur Dimensionierung eines Microgrids vor. Das System besteht aus einer elektrischen Last, einer Photovoltaikanlage, einem Batteriespeicher, einem Elektrolyseur, einer Brennstoffzelle und einem Wasserstoffspeicher. Es handelt sich also nicht um eine HRS, trotzdem ist die Methodik in diesem Zusammenhang relevant. Das Simulationsmodell besteht aus linearisierten Komponentenmodellen und evaluiert Systemkonfigurationen hinsichtlich der Kosten mit der Annuitätenmethode, in die neben Kapital- auch Wartungs- und Betriebskosten einfließen. Die Simulationsschrittweite beträgt eine Woche und der simulierte Zeitraum ist ein Jahr. Die verhältnismäßig große Schrittweite wird gewählt, da andernfalls die Berechnungsdauer zu hoch ausfällt. Die Systemkonfigurationen werden mit einem Genetischen Algorithmus optimiert, der das Simulationsmodell als Evaluationsfunktion nutzt. Das Ergebnis der Optimierung wird geprüft, indem mit höherer zeitlicher Auflösung und einem rollierenden Simulationshorizont die beste Konfiguration erneut simuliert wird. Ergebnis dieses Schrittes ist, dass die ursprünglich gefundene Konfiguration Mängel aufweist. Diese werden nachträglich behoben.

Der zugrundeliegende Ansatz ist grundlegend auch auf HRS anwendbar. Allerdings ist die zeitliche Auflösung des vorgestellten Modells mit einer Schrittweite von einer Woche für die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit zu grob beziehungsweise die Berechnungsdauer für geringere Schrittweiten ist zu hoch. Die Komponentenmodelle erlauben kein nicht-lineares Verhalten, zudem fehlen die Modelle „Wasserstoffverdichter“ und „Zapfsäule“, um eine HRS abbilden zu können.

#### 3.3.2. Betrieb von Wasserstoffsystemen

Neben der Auslegung bestimmen der Betriebsmodus und die Betriebsstrategie die Kosten eines Wasserstoffsystems wie einer HRS. Als Betriebsmodus wird in dieser Arbeit die genutzte Stromversorgungsvariante des Elektrolyseurs beziehungsweise

### 3. Literaturanalyse und vorangegangene Arbeiten

seine Marktteilnahme betrachtet. Dazu zählen der Bezug von am Spotmarkt gekaufter Energie über das öffentliche Stromnetz oder die Regelenergiemarktteilnahme des Elektrolyseurs oder eine WEA-Anbindung. Als Betriebsstrategie wird in Abgrenzung dazu die Handlungsstrategie innerhalb eines Betriebsmodus' verstanden. Dies könnten beispielsweise Regeln zum Stromhandeln (kaufe Strom, wenn er günstiger ist als ein bestimmter Wert) oder Gebotsstrategien für die Teilnahme am Regelenergiemarkt sein. In dieser Arbeit werden Betriebsmodi und -strategien nicht untersucht, aber für die Topologieoptimierung und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen vorausgesetzt. Deshalb wird im Folgenden ein Überblick über bestehende Untersuchungen zum Betrieb von HRS gegeben und es werden eigene Voruntersuchungen vorgestellt.

Carr et al. (2016) [76] entwickeln eine Betriebsstrategie, die für eine HRS mittels Simulation erprobt wird. Das zugrundeliegende Simulationsmodell verwendet lineare Modelle der Tankstellenkomponenten. Der Betriebsmodus sieht eine WEA-Anbindung mit ergänzendem Netzstrombezug vor. Die Betriebsstrategie besteht in einem Optimierungsalgorithmus, der die Betriebskosten minimiert und dabei Prognosen für Windenergieverfügbarkeit, Strompreise und Wasserstoffbedarf mit einem Prognosehorizont von 24 Stunden berücksichtigt. Investitionskosten der Komponenten werden jedoch vernachlässigt. Die Simulationsschrittweite beträgt 30 Minuten und der simulierte Zeitraum umfasst einen Monat. Es werden perfekte Prognosen verwendet, das heißt, es wird angenommen, dass man die prognostizierten Größen ideal voraussagen kann (Perfect Foresight). Ergebnis der Untersuchung ist, dass die Betriebsstrategie vorteilhaft gegenüber einem nicht-optimierten Betrieb ist.

García Clúa et al. (2011) [77] betrachten ebenfalls einen Betriebsmodus, der sowohl eine WEA-Anbindung als auch Netzstrombezug vorsieht. Es werden drei Betriebsstrategien vorgestellt und untersucht, die jeweils entweder die für Elektrolyse genutzte Windenergie, die produzierte Wasserstoffmasse oder den Anteil grünen Wasserstoffs maximieren. Bei dem untersuchten System handelt es sich jedoch nicht um eine Wasserstofftankstelle, sodass Wasserstoffnachfrage nicht als Randbedingung des Betriebs verwendet wird.

Kopp et al. (2017) [78] werten das Projekt Energiepark Mainz aus technischer und ökonomischer Sicht aus. Dabei werden drei verschiedene Betriebsmodi für einen Elektrolyseur mit Polymerelektrolytmembran betrachtet. Ein Teil des produzierten Wasserstoffs wird zu einer HRS geliefert. Die drei simulierten und getesteten Betriebsmodi sind Spotmarktteilnahme, die Erbringung sekundärer Regelleistung und die Nutzung von Energie eines Windparks, die von den Autoren als Überschussstrom bezeichnet wird. Lediglich für die Windenergieverfügbarkeit werden Prognosen verwendet, die allerdings nicht direkt in den Betriebsstrategien Anwendung finden, sondern für die Abschätzung der Überschussenergie genutzt werden. Bewertungskriterium sind Wasserstoffgestehungskosten, in deren Berechnung allerdings nicht die Investitionsausgaben (Capex) von Elektrolyseur und Verdichter mit einfließen. Zudem besteht kein vorgegebenes Wasserstoffnachfrageprofil. Es fließt somit nicht negativ in die Bewertung von Betriebsstrategien ein, wenn nur sehr wenig Wasserstoff produziert wird.

### 3.3. Auslegung und Betrieb von Wasserstoffsystemen

Dies führt zu irreführenden Ergebnissen, da so nur die spezifischen Betriebskosten bewertet werden. Die auftretende geringe Auslastung von 4 % bis 25 % führt somit zu geringen Kosten, da die Stunden der geringsten Energiepreise beziehungsweise der höchsten Windenergieverfügbarkeit zur Wasserstoffproduktion verwendet werden können. Würden die Capex allerdings ebenfalls berücksichtigt, würden sich erheblich höhere Wasserstoffproduktionskosten ergeben. Eine Bewertung von Betriebsmodi und -strategien basierend auf dieser Methodik kann somit keine Grundlage für vorliegende Arbeit sein.

Guinot et al. (2015) [79] untersuchen die Wirtschaftlichkeit eines Elektrolyseurs unter Primärregelenergiemarktteilnahme in Frankreich. Ergebnis der Untersuchung ist, dass aktuelle Marktbedingungen zu einem Anstieg der Wasserstoffgestehungskosten gegenüber anderen Betriebsmodi führen und die Regelenergiemarktteilnahme gegenwärtig unattraktiv machen.

Grüger et al. (2016) [80] simulieren und analysieren zwei Betriebsmodi eines Elektrolyseurs und einer Brennstoffzelle außerhalb des HRS-Kontexts: Die Kombination mit einer WEA im Sinne eines Ausgleichs der Prognoseabweichungen sowie die Teilnahme am sekundären Regelenergiemarkt in Deutschland. Bewertungskriterium sind in beiden Fällen die LCOH<sub>2</sub> im Falle von Elektrolyse beziehungsweise die Einnahmen je Kilogramm Wasserstoff im Falle der Brennstoffzelle. Dabei werden allerdings Capex sowie Steuern, Abgaben und Umlagen auf bezogene Energie vernachlässigt. Die Ergebnisse besagen, dass die Einnahmen aus dem Betrieb der Brennstoffzelle die LCOH<sub>2</sub> in beiden Modi nicht übersteigen und diese Betriebsweisen deshalb nicht wirtschaftlich sind.

Grüger et al. (2018) [81] betrachten die Kopplung einer HRS mit einer WEA und einem Stromnetzanschluss. Alle relevanten HRS-Komponenten werden modelliert und in ein Simulationsframework überführt. Dieses dient der ökonomischen Bewertung des HRS-Betriebs auf Basis einer Annuitätenbetrachtung, die neben Capex auch Betriebs- und Wartungskosten berücksichtigt. Kern des Beitrags ist die Entwicklung und simulative Erprobung einer prädiktiven Betriebsstrategie, die Prognosen für Wasserstoffnachfrage, Windenergieverfügbarkeit und Strompreise berücksichtigt. Dabei handelt es sich nicht um perfekte Vorhersagen, sondern um realistische Prognosen mit sich je nach Prognosehorizont ändernder Prognosegüte. Daten zur Windenergieverfügbarkeit sowie die zugehörige Prognose entstammen tatsächlichen Mess- und Prognosedaten eines existierenden Windparks, während für die Erstellung der Strompreis- und Wasserstoffnachfrageprognosen Modelle entwickelt und vorgestellt werden. Auch diese Modelle greifen nur auf Informationen zurück, die in einem tatsächlichen HRS-Betrieb zur Verfügung stehen würden, sodass die Anwendbarkeit der Strategie gewährleistet ist. Dieser prädiktiven Betriebsstrategie wird eine alternative, auf Regeln basierende Strategie gegenübergestellt und beide werden auf zwei Szenarien angewendet. Das erste Szenario sieht einen Betrieb ohne WEA vor. Hier hat die Betriebsstrategie hauptsächlich Einfluss auf die Zeitpunkte, zu denen Energie am Spotmarkt eingekauft wird. Die Kombination aus geringen Preisunterschieden und

### 3. Literaturanalyse und vorangegangene Arbeiten

einem niedrigen Kostenanteil des Strompreises an den Gesamtkosten führt zu einem geringen Einfluss der prädiktiven Strategie auf die LCOH<sub>2</sub>. Im zweiten Szenario ist eine WEA in das System integriert. Die Betriebsstrategie kann in diesem Szenario Einfluss darauf nehmen, welche Teile der WEA-Energie für Elektrolyse genutzt werden können und welche am Spotmarkt verkauft werden müssen. Wird beispielsweise der Wasserstoffspeicher in Zeiten geringen Windaufkommens unter der Nutzung von Netzstrom vollständig mit Wasserstoff gefüllt, kann später verfügbare Windenergie gegebenenfalls nicht für Elektrolyse genutzt werden. Die prädiktive Strategie kann die LCOH<sub>2</sub> in diesem Szenario um 9% gegenüber der einfacheren Strategie senken und den Anteil grünen Wasserstoffs um 19% erhöhen. Das zweite Szenario ist zudem dem ersten sowohl bei einem Vergleich auf Basis der simplen als auch auf Basis der prädiktiven Strategie überlegen. Ein Ergebnis der Untersuchung ist folglich, dass ein Betriebsmodus mit WEA-Nutzung vorteilhaft gegenüber reiner Netzstromnutzung ist. Die erforderlichen Berechnungsdauern der prädiktiven Betriebsstrategie von mehreren Tagen für die Simulation eines Jahres machen sie jedoch ungeeignet für eine Topologieoptimierung.

#### 3.3.3. Zusammenfassung von Kapitel 3.3

In diesem Kapitel wurde Literatur zu Auslegung und Betrieb von HRS vorgestellt und ausgewertet. Folgende Aspekte sind besonders relevant:

- Zur Auslegung von Wasserstoffsystemen bestehen Untersuchungen, die jedoch nur in einigen Fällen eine Optimierung der Komponentendimensionierung beinhalten.
- In diesen wiederum wird entweder keine vollständige Optimierung unter Einbezug aller relevanten Komponenten durchgeführt oder die vorgeschlagene Methodik erfordert inakzeptabel hohe Berechnungsdauern.
- Bezüglich des Betriebs von HRS kann zwischen Betriebsmodus und Betriebsstrategie unterschieden werden. Der Modus legt demnach die Strombezugsvariante (zum Beispiel WEA-Anbindung oder Spotmarktteilnahme) fest, während die Betriebsstrategie Regeln oder Algorithmen beispielsweise zur Marktteilnahme beinhaltet.
- Bisherige Untersuchungen zeigen, dass insbesondere die Kopplung des Elektrolyseurs mit Erneuerbare-Energie-Anlagen wie zum Beispiel WEA in Kombination mit einem ergänzenden Stromnetzanschluss vorteilhaft ist.
- In vorangegangenen Arbeiten wurde eine prädiktive Betriebsstrategie entwickelt, die insbesondere im Modus WEA-Kopplung vorteilhaft ist. Der erforderliche Berechnungsaufwand macht sie jedoch ungeeignet für eine Topologieoptimierung.

## 3.4. Nutzen von Tankinfrastruktur für private Nachfrager

In dieser Arbeit wird Wasserstoff-Tankinfrastruktur für Flotten untersucht und ausgelegt. Dabei geht es auch darum, zu bewerten, welchen Nutzen eine solche Infrastruktur für private Fahrzeugbetreiber bietet. Da es kein allgemeingültiges Maß für diesen Nutzen gibt, soll in dieser Arbeit ein solches entwickelt (siehe Kapitel 6) und dabei bisheriges Tankverhalten berücksichtigt werden. Im Folgenden wird deshalb zunächst ein Überblick über die Literatur zum Tankverhalten gegeben (siehe Kapitel 3.4.1). Anschließend werden darauf aufbauende Modelle zur optimierten Positionierung von Tankstellen vorgestellt und diskutiert (siehe Kapitel 3.4.2 und 3.4.3).

### 3.4.1. Tankverhalten privater PKW-Nutzer

Kitamura et al. (1987) untersuchten in den Jahren 1978/1980 das Tankverhalten privater PKW-Nutzer in den USA [82]. Es wurden etwa 1500 Fahrer während des Tankvorgangs an Tankstellen befragt. Ein Ergebnis der Untersuchung ist, dass häufig in der Nähe des Zuhauses getankt wurde: 72 % der Tankvorgänge fanden in maximal fünf Minuten Fahrtfernung von Startpunkt oder Ziel einer Fahrt statt und das Zuhause war in 75 % der Fälle Startpunkt oder Ziel. Zumeist war die Tankstelle nicht das eigentliche Ziel einer Fahrt, sondern ein Zwischenstopp. Entsprechend entfielen nur 7 % der Tankvorgänge auf Fahrten vom Zuhause zur Tankstelle und zurück.

Eine vergleichbare Untersuchung wurde von Kuby et al. (2013) [83] durchgeführt. In dieser wurden allerdings nicht nur Fahrer konventioneller Fahrzeuge (264 Befragte), sondern zu Vergleichszwecken auch Fahrer von Erdgasfahrzeugen (254 Befragte) befragt. Einige Ergebnisse aus [82] konnten bestätigt werden. So war das Zuhause in 86 % (Benzin) beziehungsweise in 76 % (Erdgas) der Fälle Startpunkt oder Ziel einer Fahrt mit Tankvorgang. Fahrten zu einer Tankstelle als alleinigem Ziel führten zu 1 % der Tankvorgänge. Die Beobachtung aus [82], dass tendenziell zu Beginn oder am Ende einer Fahrt getankt wird, konnten nicht bestätigt werden. Unter den Fahrern von Benzinfahrzeugen konnte keine Präferenz für eine Tankstelle in der Nähe des Startortes oder des Ziels festgestellt werden, während Fahrer von Erdgasfahrzeugen eher in der Mitte ihrer Fahrt tankten. Obwohl Fahrer von Benzinfahrzeugen Tankstellen in der Nähe ihres Zuhauses bevorzugten, bewerteten die Autoren dies für Nachfrager nach Kraftstoffen ohne flächendeckende Tankinfrastruktur als verzichtbaren Luxus. Es sei vielmehr sinnvoller, Tankstellen entlang vielbefahrener Routen statt in der Nähe von Wohngebieten zu errichten. In einer weiteren Veröffentlichung [84], basierend auf derselben Befragung, beleuchteten die Autoren diesen Aspekt näher. Betrachtet wurde der Fall, dass keine Tankstelle verfügbar war, die sowohl nah am Zuhause lag als auch ohne größere Umwege auf einer Route erreichbar war. Dann bevorzugten zehn Mal mehr Fahrer eine Tankstelle entlang der Route (aber weit vom Zuhause entfernt) gegenüber einer (nur mit Umweg erreichbaren) Tankstelle nah am Zuhause.

### 3. Literaturanalyse und vorangegangene Arbeiten

Bunzeck et al. (2010) befragten etwa 2970 Personen in den Niederlanden zu ihrem Tankverhalten [85]. Demnach fanden 58 % der Tankvorgänge in höchstens fünf Minuten Fahrtfernung zum Startpunkt oder Ziel einer Fahrt und weitere 25 % höchstens weitere fünf Minuten später statt. Auffällig ist der mit 20 % im Vergleich zu [82], [83] und [84] hohe Anteil der Tankvorgänge, die auf eine Fahrt vom Zuhause zu einer Tankstelle und zurück entfielen. Vor allem ältere Menschen gaben dieses Tankverhalten an. Die Autoren vermuten, dass dies bei Ruheständlern darauf zurückzuführen ist, dass weniger regelmäßige Fahrten (zum Beispiel zum Arbeitsplatz) stattfinden, im Zuge derer getankt werden kann.

Für die Untersuchung von Brey et al. (2016) wurden 230 spanische Autofahrer befragt [86]. 57 % der Tankvorgänge fanden innerhalb von fünf Minuten Fahrtfernung vom Startort oder Ziel statt. Dabei fanden zwei Drittel dieser Tankvorgänge in der Nähe des Zuhauses statt. Während 29 % angaben, auf dem Weg zu einem anderen Ziel (aber nicht in dessen unmittelbarer Nähe) zu tanken, entfielen 14 % der Tankvorgänge auf Fahrten zur Tankstelle und zurück.

Nicholas et al. (2010) untersuchen in [87] drei Ansätze zur örtlichen Vorhersage des Kraftstoffabsatzes. Der erste Ansatz basiert auf der Annahme, dass in der Nähe des Zuhauses getankt wird. Entsprechend wird die Bevölkerungsverteilung herangezogen, um den Kraftstoffabsatz anzunähern. Dem gegenüber steht der zweite Ansatz, dem die Annahme zugrunde liegt, dass Fahrer vorwiegend auf dem Weg zu einem anderen Ziel tanken. Deshalb werden statt der Bevölkerungsverteilung Verkehrsströme als Kriterium verwendet. Der dritte Ansatz verwendet ein neues Maß, das von den Autoren Population Traffic genannt wird. Es basiert auf der Annahme, dass Fahrer bevorzugt zwischen ihrem Zuhause und der nächsten Fernstraßenauffahrt tanken. Diese drei Ansätze werden evaluiert, indem mit ihnen jeweils der Kraftstoffabsatz der Tankstellen eines städtischen Betrachtungsgebiets prognostiziert und mit dem tatsächlichen Absatz verglichen wird. Alle Ansätze können den Kraftstoffabsatz zu einem gewissen Grad annähern. Bei feinerer geographischer Auflösung ist der dritte Ansatz (Population Traffic) dem zweiten und der wiederum dem ersten überlegen. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse ist jedoch ungewiss. Insbesondere unterscheidet sich diese Untersuchung in ihrer Aussagekraft von den zuvor vorgestellten insofern, als dass nicht das Tankverhalten der Bevölkerung im Betrachtungsgebiet untersucht, sondern der Kraftstoffabsatz insgesamt (inklusive Durchgangsverkehr) betrachtet wird.

Aus den vorgestellten Untersuchungen können nun verschiedene Ansätze abgeleitet werden. Eine Besonderheit stellt der in [87] genannte Ansatz dar, der auf der Annahme basiert, Menschen würden bevorzugt zwischen ihrem Wohnort und der nächsten Fernstraßenauffahrt tanken. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse ist jedoch fraglich. Deshalb wird dieser Ansatz im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Stattdessen werden zur weiteren Diskussion die vorgestellten empirischen Ansätze ausgewertet. Gemäß denen bevorzugt Fahrer entweder in der Nähe eines Ortes (zum Beispiel in der Nähe des Zuhauses oder des Arbeitsortes) oder entlang einer Route (zum Beispiel auf der Fahrt zum Arbeitsort) zu tanken. Zur ersten Kategorie zählt auch die

Fahrt zur Tankstelle mit alleinigem Zweck des Auftankens. Die erwähnten Umfragen legen nahe, dass der Nähe einer Tankstelle insbesondere zum Wohnort eine besondere Bedeutung zukommt. Allerdings beziehen sich diese Umfragen zumeist auf Fahrer konventioneller Fahrzeuge, denen eine große Auswahl an Tankstellen zur Verfügung steht. Dem steht die These gegenüber, dass im Falle einer lückenhaften Tankinfrastruktur die Bedeutung der Nähe einer Tankstelle zum Wohnort in den Hintergrund rückt und die Verfügbarkeit von Tankstellen entlang der regelmäßigen Routen wichtiger ist [84]. Zusätzlich sind Fahrer auf längeren Strecken in jedem Fall gezwungen, entlang der Route zu tanken. In der vorliegenden Arbeit werden diese beiden Annahmen („Tanken in der Nähe des Zuhauses“ und „Tanken auf dem Weg zu einem Ziel“) berücksichtigt, für die im Folgenden jeweils Methoden vorgestellt werden, die eine optimierte Positionierung von (Wasserstoff-)Tankstellen zum Ziel haben.

#### 3.4.2. Ansätze zur Abbildung von „Tanken in der Nähe des Zuhauses“

Für diese Arbeit ist eine Methodik zur Bewertung eines Netzwerks aus Wasserstoff-Tankstellen hinsichtlich des Nutzens für private FCEV-Nutzer erforderlich. In der Literatur finden sich allerdings vorwiegend Ansätze zur optimalen Positionierung von Tankstellen. Diesen liegt jedoch eine Bewertung zugrunde, sodass grundsätzlich auf bestehende Methodik zurückgegriffen werden kann. Im Folgenden werden nun Ansätze vorgestellt, die auf der Annahme basieren, dass Menschen vorzugsweise in der Nähe ihres Wohnorts tanken (siehe Kapitel 3.4.1).

##### **P-Median-Ansatz**

Mit dem P-Median-Ansatz lassen sich für eine gegebene Anzahl an Tankstellen optimale Positionen finden. Das Optimierungsziel ist, den durchschnittlichen Abstand von Kraftstoffnachfragern zur nächstgelegenen Tankstelle zu minimieren. Alternativ kann die durchschnittliche Reisezeit bis zur nächstgelegenen Tankstelle minimiert werden. Der Ansatz wird von ReVelle et al. (1970) in [88] beschrieben.

Üblicherweise wird der Ansatz auf ein Graphen-Problem angewendet. Der Graph besteht dabei aus Knoten und Kanten. Die Knoten stellen Nachfrager (repräsentiert zum Beispiel durch Wohnviertel), die Kanten Straßenverbindungen zwischen den Nachfragern dar. Jeder Knoten hat als Eigenschaft die Quantität der Nachfrage, während den Kanten Kosten für die Nutzung dieser Verbindung zwischen zwei Knoten zugeordnet werden. Kosten können in diesem Fall entweder die Distanz zwischen den verbundenen Knoten oder die für die Überwindung der Distanz erforderliche Reisezeit sein. Tankstellen können nur an Knoten positioniert werden. Ein Algorithmus verteilt die gegebene Anzahl an Tankstellen dann derart auf die Knoten, dass das Optimierungsziel erfüllt wird. [88]

Dieser Ansatz wird von Nicholas et al. (2004) in [89] auf Sacramento County, Kalifornien, USA angewendet. Nicholas und Ogden (2007) wenden diesen Ansatz in [90]

### 3. Literaturanalyse und vorangegangene Arbeiten

außerdem auf vier Metropolregionen in Kalifornien an. Darüber hinaus bestehen Abwandlungen dieses Vorgehens. So beschreiben Lin et al. (2008) in [91] beispielsweise eine Methode zur Tankstellenpositionierung, die Nachfrage proportional zur Verkehrsleistung auf Straßenabschnitten annimmt, statt davon auszugehen, sie sei proportional zur Bevölkerung in einem Wohngebiet (entsprechend einem Knoten). Die Nachfrage wird anschließend allerdings in Knoten aggregiert, sodass der P-Median-Ansatz auf das Problem angewendet werden kann.

Ein Nachteil dieses Ansatzes ist, dass das Optimierungskriterium nur eingeschränkte Relevanz in der Praxis hat. Denn ein möglichst niedriger, durchschnittlicher Abstand aller Nachfrager zur nächstgelegenen Tankstelle kann für jeden einzelnen Nachfrager in der Praxis einen zu großen Abstand bedeuten, um die Tankstelle im Alltag sinnvoll nutzen zu können. In solch einem Fall wäre es sinnvoller, für einige Nachfrager einen besonders geringen Abstand zu erreichen und in Kauf zu nehmen, andere Nachfrager vollkommen unberücksichtigt zu lassen. Ein weiterer Nachteil ist, dass das tatsächliche Fahrverhalten nicht abgebildet werden kann. Es ist zudem kein Kriterium, welcher Anteil der gewünschten Fahrten mit dem Tankstellennetzwerk ermöglicht wird.

#### **Maximum-Cover-Ansatz**

Der Maximum-Cover-Ansatz ist dem P-Median-Ansatz grundsätzlich ähnlich, denn auch hier wird eine gegebene Anzahl an Tankstellen optimal positioniert. Das Optimierungsziel ist jedoch nicht die Minimierung der durchschnittlichen Distanz (beziehungsweise Reisezeit) aller Nachfrager. Es wird vielmehr davon ausgegangen, dass eine Tankstelle ein Einzugsgebiet hat und Menschen, die in diesem Einzugsgebiet wohnen, von der Tankstelle versorgt werden können. Optimierungsziel ist deshalb, die Anzahl der Menschen, die vom Tankstellennetz abgedeckt werden, durch Positionierung der Tankstellen zu maximieren. Dieser Ansatz wird von Church und ReVelle (1974) in [92] beschrieben.

Auch dieser Ansatz kann auf ein Graphen-Problem angewendet werden. Das Einzugsgebiet der Tankstelle wird dann übersetzt in eine maximale Distanz oder Reisedauer entlang der Kanten, innerhalb der die Tankstelle erreicht werden können muss. Wird eine Tankstelle auf einem Knoten positioniert, gelten dieser Knoten und alle weiteren Knoten, die demgemäß im Einzugsgebiet der Tankstelle liegen, als abgedeckt. Gleichwohl ist dieser Ansatz nicht auf die Anwendung auf Graphen beschränkt. So bestimmen Stephens-Romero et al. (2010) in [93] ein Tankstellennetzwerk für die Stadt Irvine, Kalifornien, USA. Dabei wird für jede untersuchte Konfiguration aus Tankstellen der Anteil der erschlossenen Straßenkilometer sowie die erschlossene Fläche ermittelt und als Kriterium herangezogen. Stephens-Romero et al. (2011) erweitern diese Betrachtung in [39] auf ein größeres Gebiet und um weitere Aspekte wie die Versorgung der Tankstellen mit Wasserstoff.

Der Maximum-Cover-Ansatz kann als Verbesserung gegenüber dem P-Median-Ansatz betrachtet werden, da er durch sein Optimierungskriterium und das Konzept des

Einzugsgebiets eine höhere Praxisrelevanz aufweist als die Minimierung des durchschnittlichen Abstands der Nachfrager zur nächstgelegenen Tankstelle. Die übrigen beschriebenen Nachteile des P-Median-Ansatzes (keine Abbildung des tatsächlichen Fahrverhaltens, Anteil ermöglichter Fahrten ist kein Kriterium) gelten allerdings auch für den Maximum-Cover-Ansatz.

#### 3.4.3. Ansätze zur Abbildung von „Tanken auf dem Weg zu einem Ziel“

Die zuvor vorgestellten Methoden basieren auf der Annahme, dass eine Tankstelle in der Nähe des Zuhauses genügt, um den Tankbedürfnissen zu entsprechen. Die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen gründen hingegen auf der Annahme, dass Tankstellen entlang üblicher Routen positioniert sein sollten.

##### Traffic-Capturing-Ansatz

Dieser Ansatz betrachtet keine Individuen und ihre persönlichen Routen, sondern nutzt als Grundlage für die optimierte Positionierung von Tankstellen Verkehrsdaten des Straßennetzes. Dabei muss die Verkehrsstärke, zum Beispiel gemessen in passierenden PKW pro Tag je Straßenabschnitt vorliegen. In einem einfacheren Ansatz [62] von Melendez et al. (2005) wird die Verkehrsstärke als Kriterium zur Auswahl von Straßen gewählt, an denen Tankstellen positioniert werden sollen. Optimierungsmethoden gehen darüber hinaus. Dazu wird die Verkehrsstärke einer Straße multipliziert mit der jeweiligen Länge des Straßenabschnitts, um das Maß PKW-Kilometer zu erhalten. Es wird angenommen, dass eine Tankstelle in der Nähe eines Straßenabschnitts den gesamten über ihn laufenden Verkehr, also die entsprechenden PKW-Kilometer abdeckt. Der Ansatz ist geeignet, eine definierte Anzahl an Tankstellen so zu positionieren, dass die insgesamt erfassten PKW-Kilometer maximiert werden. Dieser Ansatz wird von Brey et al. (2016) in [86] beschrieben.

Übersetzt man diesen Ansatz in ein Graphen-Problem, so bilden die Kanten Straßen und die Knoten Kreuzungen ab. Jeder Kante sind die jeweiligen PKW-Kilometer zugeordnet. Tankstellen können nur auf Knoten positioniert werden. Die PKW-Kilometer angrenzender Kanten (oder aller Kanten in einem definierten Einzugsgebiet der Tankstelle) gelten dann als abgedeckt. In [86] wird dieser Ansatz im Rahmen einer Mehrzieloptimierung mit dem Maximum-Cover-Ansatz kombiniert. Dabei gilt nicht ein Einzugsgebiet, sondern es werden verschiedene Einzugsgebiete (500 m und 1000 m Radius) gleichzeitig mit jeweils unterschiedlichen Wichtungen verwendet. Diese Methode wird auf die Stadt Sevilla, Spanien, angewendet. Stephens-Romero et al. (2010) wenden einen vergleichbaren Ansatz in [93] in Kombination mit einem Maximum-Cover-Ansatz an. Diese Betrachtung wird, wie schon erwähnt, von Stephens-Romero et al. (2011) in [39] erweitert.

Der Traffic-Capturing-Ansatz erfordert nur wenige und in der Regel gut verfügbare Daten: Das Straßennetz des Betrachtungsgebiets mit Angabe der Straßenlängen

### 3. Literaturanalyse und vorangegangene Arbeiten

sowie die Verkehrsstärke auf diesen Straßen. Nachteilig ist, dass keine individuellen Fahrten oder Fahrer betrachtet werden. Somit kann es passieren, dass zwei aneinander angrenzenden Straßenabschnitten mit sehr hohem Verkehrsaufkommen jeweils eine Tankstelle zugeordnet wird. Ein nennenswerter Teil des Verkehrs wird dann doppelt als erfasst gezählt, obwohl die zweite Tankstelle keinen zusätzlichen Nutzen für diesen Anteil des Verkehrs bietet. Auch ist es nicht möglich, zu prüfen, welcher Anteil von Fahrten tatsächlich mit Hilfe des errichteten Tankstellennetzwerks möglich ist. Dazu müsste der Verlauf einzelner Fahrten berücksichtigt werden, wozu dieser Ansatz nicht geeignet ist.

#### **Flow-Capturing-Ansatz**

Der Flow-Capturing- ist dem Traffic-Capturing-Ansatz sehr ähnlich. Allerdings basiert er nicht auf der Verkehrsstärke von Straßen, sondern auf Verkehrsströmen zwischen zum Beispiel Städten. Es müssen also für das Betrachtungsgebiet Daten dazu vorhanden sein, wie viele Fahrten von jeder Stadt im Betrachtungsgebiet zu jeder anderen Stadt beispielsweise innerhalb eines Jahres unternommen werden, sogenannte Ursprung-Ziel-Daten. Danach werden die Routenverläufe zwischen den Städten bestimmt. Wird eine Tankstelle an einer Straße positioniert, dann wird in diesem Ansatz davon ausgegangen, dass alle Fahrten, die über diesen Straßenabschnitt führen, erfasst werden. Mit Hilfe des Ansatzes lässt sich eine gegebene Anzahl an Tankstellen so positionieren, dass die Anzahl erfasster Fahrten maximiert wird. Diese Methode wird von Hodgson et al. (1990) in [94] beschrieben, in ein Graphen-Problem überführt und auf das Straßennetzwerk in Edmonton, Kanada angewendet.

Wird dieser Ansatz in ein Graphen-Problem übersetzt, so stellen Kanten Straßen und Knoten Straßenkreuzungen dar. Jeder Kante sind die Fahrten, die über sie führen zugeordnet. Tankstellen können nur auf Knoten positioniert werden und erfassen dann alle Fahrten, die über diesen Knoten führen. Hodgson et al. (1992) wenden den Flow-Capturing-Ansatz in [95] in Kombination und vergleichend mit dem P-Median-Ansatz an. Als Ziele gelten einerseits die Maximierung der erfassten Fahrten (Flow-Capturing-Ansatz) und andererseits die Minimierung der gewichteten, durchschnittlichen Distanz zwischen dem jeweiligen Zuhause der Menschen im Betrachtungsgebiet und der nächsten Tankstelle (P-Median-Ansatz).

Dieser Ansatz ist insofern vorteilhaft gegenüber dem Traffic-Capturing-Ansatz, als dass keine Doppelzählung von Fahrten erfolgt und tatsächliche Routen berücksichtigt werden können. Nachteilig ist, dass die entsprechenden Ursprung-Ziel-Fahrt Daten verfügbar sein müssen. Liegen diese nicht vor, müssen sie angenähert werden. Dazu kann beispielsweise ein Gravity-Ansatz herangezogen werden, der Fahrthäufigkeiten zwischen zwei Städten auf Basis von deren Distanz und jeweiligen Einwohnerzahlen abschätzt. Von dieser Möglichkeit wird in [94] und [96] Gebrauch gemacht. Darüber hinaus müssen realistische Routenverläufe entlang des Straßennetzwerks ermittelt werden. Dies kann bei einem komplexen Straßennetzwerk und vielen betrachteten Städten sehr rechen- und zeitaufwändig sein. Ein weiterhin bestehender Nachteil ist

die Vernachlässigung der Fahrzeugreichweite. Es ist somit nicht möglich, zu erfassen, welche der zugrunde gelegten Fahrten tatsächlich mit dem ermittelten Tankstellennetzwerk möglich sind. Eine beispielsweise 1000 km lange Fahrt würde mit diesem Ansatz als möglich erkannt, wenn eine Tankstelle am Ursprung platziert würde.

#### **Flow-Refueling-Ansatz**

Der Flow-Refueling-Ansatz erweitert den Flow-Capturing-Ansatz um den Aspekt der Fahrzeugreichweite. Es sind also ebenso Daten zu Verkehrsströmen zwischen den Städten im Betrachtungsgebiet sowie zum Straßennetzwerk erforderlich. Eine Fahrt von einer Stadt in eine andere wird dann als möglich angesehen, wenn bei einer Verkettung des Hin- und Rückwegs der größte Abstand zwischen Tankstellen entlang der Route kleiner als die Fahrzeugreichweite ist. Mit Hilfe des Ansatzes lässt sich nun eine gegebene Anzahl an Tankstellen so an Straßenkreuzungen positionieren, dass die Anzahl der möglichen Fahrten maximiert wird. Diese Methode wird von Kuby et al. (2005) in [97] eingeführt und beschrieben. Die Autoren überführen den Ansatz in ein Graphen-Problem mit Straßen als Kanten und Straßenkreuzungen als Knoten und präsentieren einen Algorithmus zur Lösung des Problems. Bei einer vereinfachten Betrachtung des Straßennetzwerks werden die Routen zwischen je zwei Städten zu einer Straße beziehungsweise Kante zusammengefasst, sodass Straßenkreuzungen beziehungsweise Knoten gleichbedeutend mit Städten sind. Kuby et al. (2009) wenden den Ansatz in [96] auf den Bundesstaat Florida, USA an.

Es bestehen Weiterentwicklungen auf Basis dieser Methodik. So stellen Kuby et al. (2007) in [98] eine Abwandlung vor, die es erlaubt, Tankstellen nicht nur an Straßenkreuzungen, sondern auch auf Straßenabschnitten vorzusehen. Kim et al. (2012) erweitern den Ansatz so, dass eine Fahrt in dem Modell auch dann als ermöglicht gewertet wird, wenn eine Tankstelle nicht direkt an der Route, sondern unter Inkaufnahme eines Umwegs erreicht wird. Der Ansatz sieht vor, dass der Anteil erfasster Fahrten reduziert wird, je länger der Umweg ist. Die Autoren zeigen an einem Beispiel, dass je nach Anzahl zu positionierender Tankstellen durch das Zulassen von Umwegen bis zu 15 % mehr Fahrten als abgedeckt gewertet werden können. Upchurch et al. (2009) präsentieren in [99] eine Erweiterung des Flow-Refueling-Ansatzes, die die Kapazität der zu positionierenden Tankstellen bestimmt oder alternativ eine Limitierung der Kapazität berücksichtigt.

Eine grundlegende Abwandlung wird von Hong et al. (2016) in [100] beschrieben. Während zuvor jede Fahrt für sich betrachtet und bewertet wird, wird nun je Stadt der Anteil der möglichen Fahrten ermittelt. Nur wenn dieser Anteil über einem Schwellenwert (zum Beispiel 50 %) liegt, gilt diese Stadt als vom Tankstellennetzwerk versorgt. Das Optimierungsziel kann demnach die Maximierung der Anzahl versorgter Städte sein. Alternativ kann die Anzahl der Einwohner in diesen Städten oder die Anzahl möglicher Fahrten in versorgten Städten Maximierungsziel sein. Die Autoren wenden die Methode einerseits auf Florida, USA und andererseits auf die Stadt Orlando, Florida, USA an. Sie untersuchen unter anderem den Einfluss des

### 3. Literaturanalyse und vorangegangene Arbeiten

Schwellenwertes auf die sich ergebende optimale Verteilung der Tankstellen. Während sie auf Ebene des Bundesstaates beobachten, dass eine Erhöhung des Schwellenwertes zu einer stärkeren Clusterung der Tankstellen in Metropolregionen führt, kann für die Stadt Orlando eine solche Beobachtung nicht gemacht werden. Hier ergeben sich verschiedene Ausprägungen von einer gleichmäßigen Verteilung bis hin zu einer Clusterung ohne Korrelation mit der Höhe des Schwellenwertes.

Für die mathematische Lösung des Flow-Capturing-Ansatzes bestehen verschiedene Verfahren. So erwähnen Kuby et al (2009) in [96], dass das formulierte Problem ein Mixed Integer Linear Programming Problem ist. Die entsprechenden Verfahren zur Optimierung eigneten sich jedoch nur für kleinere Probleme, da ansonsten die erforderlichen Berechnungsdauern zu stark anstiegen. Deshalb wenden die Autoren für ein realistischeres, umfangreicheres Szenario ein sogenanntes Greedy Adding- und später ein Greedy Adding and Replacing-Verfahren an. Bei ersterem wird sukzessive für einzelne Tankstellen der jeweils beste Standort gefunden, statt alle Tankstellen gleichzeitig zu positionieren. Dies kann aber dazu führen, dass global optimale Lösungen nicht gefunden werden. Eine Verbesserung in dieser Hinsicht stellt das Greedy Adding and Replacing-Verfahren dar, das nicht nur in jedem Schritt eine Tankstelle hinzufügt, sondern auch eine bestehende den Platz wechseln lässt. Dennoch kann es auch hier passieren, dass nicht die optimalen Lösungen gefunden werden. Lim et al. (2010) präsentieren in [101] eine weitere Heuristik zur Lösung des Problems in Form eines Genetischen Algorithmus. Zeng et al. (2010) präsentieren in [102] einen generalisierten Ansatz, der das Flow-Capturing Problem sowie die entsprechenden Weiterentwicklungen zusammenführt und effizienter löst, als die zuvor beschriebenen Ansätze. Capar et al. (2012) adressieren in [103] ebenfalls das Problem langer Rechendauern einerseits (Mixed Integer Linear Programming) und der Ungewissheit, ob tatsächlich die optimale Lösung gefunden wurde andererseits (Heuristiken). Dazu entwickeln sie einen Mixed Binary Integer Programming Ansatz und zeigen, dass dieser den zuvor vorgestellten Ansätzen hinsichtlich der Rechendauer überlegen ist und die optimale Lösung findet.

Für den Flow-Refueling-Ansatz gelten die gleichen Vorteile wie für den Flow-Capturing-Ansatz, allerdings besteht ebenso der Nachteil hoher Anforderungen an Datenverfügbarkeit. Der Flow-Refueling-Ansatz ist jedoch vorteilhaft gegenüber dem Flow-Capturing-Ansatz, da die Fahrzeugreichweite berücksichtigt wird und stellt eine entscheidende Weiterentwicklung dar. Denn nur mit Berücksichtigung der Fahrzeugreichweite kann bestimmt werden, welche Fahrten tatsächlich durch das zu errichtende Tankstellennetzwerk ermöglicht werden. Ein weiterer entscheidender Beitrag ist die Abwandlung des Ansatzes in [100]. Dort werden Städte nur dann als versorgt angesehen, wenn ein gewisser Anteil der Fahrten der in dieser Stadt lebenden Menschen ermöglicht wird. So wird der (allen Ansätzen) zugrundeliegenden Fragestellung Rechnung getragen: Wie muss eine Tankinfrastruktur für alternative Kraftstoffe beschaffen sein, damit die entsprechenden Fahrzeuge für die Menschen praktikabel und akzeptabel zu betreiben sind? Dies ist nur gegeben, wenn ein nennenswerter Teil der Mobilitätsanforderungen der Fahrer von einem alternativen Fahrzeugkonzept (und

Kraftstoff) erfüllt werden kann. Gleichwohl kann es weitere Anforderungen geben, zum Beispiel hinsichtlich des Tankkomforts im Alltag. Um sich dieser Fragestellung mit dem Flow-Refueling-Ansatz widmen zu können, müssten Start- und Zielorte von Fahrten innerhalb von Städten in hoher örtlicher Auflösung vorliegen. Dies ist häufig nicht der Fall, sodass stattdessen ein zusätzliches Kriterium, basierend auf einem anderen Ansatz (zum Beispiel dem Maximum-Cover-Ansatz), herangezogen werden kann.

#### **Tour-Refueling-Ansatz**

Die den bereits vorgestellten Ansätzen zugrundeliegende Annahme, dass Menschen vorzugsweise auf ihren üblichen Routen tanken, wird im Rahmen des Tour-Refueling-Ansatzes weiter spezifiziert. Es wird angenommen, dass nicht auf jeder Fahrt getankt werden muss, da die Fahrzeugreichweite im städtischen Alltagsverkehr in der Regel für deutlich mehr als eine Fahrt ausreicht. Demzufolge werden nicht einzelne Fahrten, sondern aus mehreren verketteten Fahrten bestehende Touren betrachtet. Grundlage für eine solche Betrachtung sind detaillierte Fahrtenbücher für die Haushalte im Betrachtungsgebiet. Mit Hilfe des Ansatzes werden so viele Tankstellen positioniert, wie nötig sind, um alle Haushalte zu versorgen. Ein Haushalt gilt dann als versorgt, wenn er ausgehend von seiner Tour eine Tankstelle innerhalb einer definierten maximalen Fahrtdauer erreichen kann. Der Ansatz und ein mathematisches Lösungsverfahren werden von Kang et al. (2015) in [104] präsentiert.

Der Tour-Refueling-Ansatz stellt sehr hohe Anforderungen an die Datenverfügbarkeit, da Fahrtenbücher vieler Haushalte für mindestens einen Tag erforderlich sind. Der gewonnene Mehrwert durch diesen Ansatz ist jedoch fraglich. Menschen tanken zwar nicht auf jeder Fahrt beziehungsweise sind auch nicht auf jeder Fahrt darauf angewiesen, tanken zu können. Dies spricht zunächst für die Touren- statt Fahrten-Betrachtung. Sehr wohl kann aber jede der üblichen Fahrten gerade diejenige sein, auf der getankt werden muss. Denn es ist davon auszugehen, dass die ermittelten Touren sich nicht zwangsläufig an jedem Tag genau so wiederholen.

#### **3.4.4. Sonstige Modelle und Ansätze zur Tankstellenpositionierung**

Neben den bereits beschriebenen Ansätzen gibt es auch weitere Methoden zur Positionierung von Tankstellen. Frick et al. (2007) [105] wenden mehrere Zielfunktionen gleichzeitig an. Die verschiedenen Zielfunktionen werden zu einer verschmolzen, indem jeder Zielfunktion ein Gewichtungsfaktor zugewiesen wird und die Zielfunktionen summiert werden. Eine Zielfunktion zur Identifikation optimaler Tankstellenpositionen sieht vor, dass der Abstand einer Tankstelle zum Zentrum einer Gemeinde minimiert wird. Zusätzlich soll die Anzahl der Fahrzeuge in einem Umkreis von 5 km möglichst hoch sein. Um eine flächendeckende Verteilung von Tankstellen zu erreichen, wird der mittlere, gewichtete Abstand aller positionierten und bestehenden

### 3. Literaturanalyse und vorangegangene Arbeiten

Tankstellen zueinander minimiert. Weitere Zielfunktionen betreffen die Kosten der Tankstellen.

Schwoon (2006) beschreibt in [106] eine Methode zur Optimierung einer Wasserstoff-tankstellenverteilung. Dem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, dass die empfundene Verfügbarkeit von Wasserstofftankstellen ein bedeutendes Kriterium für die Entscheidung für den Kauf eines FCEV ist. Dies sei gegeben, wenn Fahrer konventioneller Fahrzeuge regelmäßig an Wasserstofftankstellen vorbeikommen. Deshalb wird ein Grenzwert für den Abstand von zwei Wasserstofftankstellen definiert. Für jede betrachtete Positionierung der Tankstellen werden einzelne Fahrten zwischen Städten betrachtet, die aus Ursprung-Ziel-Daten, angenähert über einen Gravity-Ansatz, abgeleitet werden. Die Fahrten werden agenten-basiert simuliert. Wird auf einer Fahrt festgestellt, dass der Abstand zweier aufeinander folgender Wasserstofftankstellen den zuvor definierten Grenzwert übersteigt, fließt dies negativ in die Bewertung der zugrundeliegenden Tankstellenpositionierung ein. Die Verfügbarkeit von Tankstellen am Ursprung der jeweiligen Fahrt ist ein weiteres Kriterium.

Einige Aspekte der beschriebenen alternativen Methoden lassen sich der Annahme „Tanken in der Nähe des Zuhauses“ zuordnen. Dazu zählt beispielsweise in [105] das Kriterium der Nähe einer Tankstelle zu urbanen Gebieten sowie die Definition eines Einzugsgebiets. In [106] kann das Kriterium der Verfügbarkeit einer Tankstelle in der Stadt des Fahrtursprungs dazu gezählt werden. Der Annahme „Tanken auf dem Weg zu einem Ziel“ lassen sich in [105] das Ziel einer möglichst flächigen Verteilung der Tankstellen und in [106] die Definition eines Maximalabstands zwischen Tankstellen auf Fernstrecken zuordnen. Trotz dieser Elemente stellen die Ansätze eigenständige Vorgehensweisen dar, die jedoch Schwächen aufweisen. So wird in [105] zwar eine weite Verteilung von Tankstellen angestrebt, aber es bleibt unklar, wie hoch diese sein sollte. Der Nutzen eines bestimmten Grads an Verteilung wird nicht quantifiziert. Die Verteilung fließt mit einem frei gewählten Gewichtungsfaktor in die Optimierung ein. Je nachdem, wie dieser gewählt wird, fallen die Ergebnisse unterschiedlich aus. In [106] basieren ebenfalls viele Parameter des Modells auf willkürlich gewählten Annahmen, die aber entscheidend für das Ergebnis sein können. Deshalb können mit diesen Methoden nur eingeschränkt Erkenntnisse gewonnen werden.

#### 3.4.5. Zusammenfassung von Kapitel 3.4

In diesem Kapitel wurde Literatur zum Tankverhalten privater PKW-Nutzer sowie zu Methoden zur optimalen Tankstellenpositionierung vorgestellt und ausgewertet. Folgende Aspekte sind besonders relevant:

- Damit FCEV ein praktikables und verlässliches Fahrzeugkonzept darstellen, müssen die Mobilitätsanforderungen der Fahrer zu großen Teilen erfüllt werden können.

### 3.5. Vorangegangene Arbeiten zu Modell- und Simulationsgrundlagen

- Damit dies der Fall ist, muss das Tankstellennetzwerk den Fahr- und Tankanforderungen der Fahrer genügen.
- Es bestehen zwei Annahmen dazu, wo Fahrer konventioneller Fahrzeuge bevorzugt tanken:
  - In der Nähe ihres Zuhauses
  - Auf dem Weg zu anderen Fahrtzielen
- Zusätzlich sind Fahrer auf längeren Strecken darauf angewiesen, unterwegs zu tanken.
- Für beide Annahmen bestehen Methoden zur optimalen Positionierung von Tankstellen.
- Unter den Ansätzen zur Annahme „Tanken in der Nähe des Zuhauses“ ist der Maximum-Cover-Ansatz besonders geeignet. Dieser weist Tankstellen ein Einzugsgebiet zu und maximiert durch Tankstellenpositionierung die Anzahl darin erfasster Haushalte oder Personen.
- Unter den Ansätzen zur Annahme „Tanken auf dem Weg zu einem Ziel“ ist der Flow-Refueling-Ansatz besonders geeignet. Dieser basiert auf Daten zu Fahrthäufigkeiten zwischen allen Städten im Betrachtungsgebiet. Mit Hilfe des Ansatzes lassen sich Tankstellen so positionieren, dass möglichst viele Fahrten unter Berücksichtigung der Fahrzeugreichweite ermöglicht werden.
- Es besteht eine Abwandlung des Flow-Refueling-Ansatzes, die eine Änderung des Optimierungsziels beinhaltet. Dazu wird für jede Stadt als Kriterium gewählt, wie viele der von ihr ausgehenden Fahrten durch das auszulegende Tankstellennetz ermöglicht werden. Es wird dann mittels Tankstellenpositionierung die Anzahl der Städte maximiert, deren Anteil der ermöglichten Fahrten einen zuvor definierten Schwellenwert überschreitet.

### 3.5. Vorangegangene Arbeiten zu Modell- und Simulationsgrundlagen

Für die Untersuchungen dieser Arbeit wird ein Simulationsmodell einer Wasserstoff-tankstelle und ihrer Komponenten verwendet (siehe Kapitel 5). Dieses Modell und das zugehörige Simulationsframework werden in den Kapiteln 3.5.1 und 3.5.3 beschrieben. An mehreren Stellen dieser Arbeit wird darüber hinaus ein Optimierungsverfahren verwendet (siehe Kapitel 5 und 6). Dieses wird in Kapitel 3.5.2 beschrieben.

#### 3.5.1. Simulationsframework

Das verwendete Simulationsframework wurde im Rahmen der Projekte Schaufens-terprojekt Micro Smart Grid EUREF und H2BER entwickelt [107] und in einem Konferenzbeitrag (Grüger et al. (2015) [108]) sowie einem Journalbeitrag (Grüger et al. (2018) [81]) vorgestellt. Es ist in der Programmierumgebung MATLAB [109] geschrieben und ermöglicht, verschiedene Energiesystemkomponenten wie Speicher oder Erneuerbare-Energie-Anlagen und Energieverbraucher modular in einem Gesamtsystem zu kombinieren. Dabei können verschiedene Energie- und Stoffströme wie Wärme, elektrische Energie oder Wasserstoff sowie Zustandsgrößen wie Temperaturen oder Speicherstände berücksichtigt werden. In jedem Zeitschritt der Simulation übermitteln die Komponenten ihr Verhalten für den gesamten möglichen Betriebsbereich an das Framework. Ein Elektrolyseur beispielsweise könnte in einem Zeitschritt in der Lage sein, zwischen 0 und 10 kg an Wasserstoff zu produzieren, während der Bedarf an elektrischer Energie entsprechend zwischen 0 und 560 kWh liegt. Diese beiden Betriebspunkte können als Stützstellen der Modellierung des Verhaltens angesehen werden. Zwischen je zwei Stützstellen wird lineares Verhalten angenommen. Im Allgemeinen ist das Betriebsverhalten nicht-linear, sodass mehr als diese zwei Stützstellen zur Beschreibung des Verhaltens verwendet werden müssen. Das Framework akzeptiert beliebig viele Stützstellen, also abschnittsweise linearisiertes Komponentenverhalten. Ist das Verhalten jeder Komponente in einem Zeitschritt erfasst, werden Betriebspunkte für jede Komponente so bestimmt, dass sich geringste Kosten im Gesamtsystem ergeben. Um dies zu erreichen, werden aus den linearen Betriebsbereichsabschnitten der Komponenten lineare Gleichungssysteme geformt. Diese sehen vor, dass alle zu bilanzierenden Größen durch die Wahl der Betriebspunkte ausgeglichen sein müssen. Beispielsweise müsste der Elektrolyseur genau so viel Wasserstoff produzieren, wie ein Wasserstoffspeicher oder andere Komponenten aufnehmen, um die Bilanz auszugleichen. Die Kosten sind keine zu bilanzierende Größe, sondern Optimierungsziel bei der Lösung der linearen Gleichungssysteme. Es gibt je Zeitschritt so viele lineare Gleichungssysteme, wie sich Kombinationen aus den linearen Betriebsbereichsabschnitten aller Komponenten bilden lassen. Alle linearen Gleichungssysteme werden gelöst und das beste Ergebnis aus allen wird ausgewählt. Dieses beinhaltet die idealen Betriebspunkte jeder Komponente, durch deren Wahl die Kosten minimiert werden und alle zu bilanzierenden Größen im Gleichgewicht sind.

Speicher stellen eine Besonderheit dar, da ihr Verhalten in einem Zeitschritt die Güte und Handlungsoptionen des Systems in einem späteren Zeitschritt beeinflusst. Wird beispielsweise ein Wasserstoffspeicher in einem Zeitschritt befüllt, so besteht in späteren Zeitschritten die Möglichkeit, diesen Wasserstoff wieder auszuspeichern und zu nutzen. Ein ideales Systemverhalten erfordert daher, dass die Entscheidung für einen Betriebspunkt nicht nur vom gegenwärtigen Zeitschritt abhängig gemacht wird. Im besten Fall wird eine Betriebsstrategie mit Vorausschau verwendet, die zukünftige Zeitschritte und deren Randbedingungen für diese Entscheidung mit berücksichtigt. Eine solche Betriebsstrategie wurde entwickelt, erprobt und veröffentlicht [81] (siehe

auch Kapitel 3.3.2). Gegenüber einem regelbasierten Ansatz konnten die LCOH<sub>2</sub> um 9% reduziert werden. Da diese Betriebsstrategie einen hohen Berechnungsaufwand von mehreren Tagen je simuliertem Jahr erfordert, kommt in dieser Arbeit ein einfacherer Ansatz zum Einsatz, der auf definierten Regeln basiert. Eine solche Regel könnte lauten, dass der Wasserstoffspeicher solange befüllt werden soll, bis ein gewisser Speicherstand erreicht ist. Derartige Regeln lassen sich in das oben beschriebene Simulationsframework integrieren, indem neben den Kosten eine zweite Zielgröße definiert wird. Diese fließt in gleichem Maße wie die Kosten in den Optimierungsprozess der linearen Gleichungssysteme eines Zeitschritts ein und kann deshalb als „künstliche Kosten“ bezeichnet werden. So kann beispielsweise angereizt werden, einen Speicher zu befüllen, indem negative „künstliche Kosten“ erzeugt werden. Diese Kosten werden bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht berücksichtigt und beeinflussen somit nur das strategische Betriebsverhalten der Komponenten. Bei der Modellierung jeder Komponente können Parameter vorgesehen werden, die die „künstlichen Kosten“ steuern. Ein solcher Parameter könnte im Falle des Speichers der Schwellenwert für den Speicherdruck sein, bis zu dessen Erreichen bei der Befüllung negative und bei der Entnahme positive „künstliche Kosten“ anfallen.

Dieses Framework verbindet den Vorteil linearer Ansätze (hohe Berechnungsgeschwindigkeit) mit dem Vorteil, nicht-lineares Verhalten berücksichtigen zu können. Durch die Modularität können beliebige Komponenten auf einfache Weise kombiniert werden. Deren Verhalten und Zusammenspiel, beispielsweise die Speichernutzungsstrategie, kann mittels Parametern gezielt beeinflusst werden. Mit diesem Simulationsframework wird in dieser Arbeit eine Wasserstofftankstelle simuliert.

#### 3.5.2. Genetischer Algorithmus

In der vorliegenden Arbeit wird an verschiedenen Stellen ein Optimierungsverfahren benötigt. Ein für viele Optimierungsprobleme einsetzbarer, sogenannter Genetischer Algorithmus wurde im Rahmen einer Masterarbeit [110] in der Programmierumgebung MATLAB [109] programmiert. Das Verfahren wird im Folgenden am Beispiel der Topologieoptimierung einer Wasserstofftankstelle vorgestellt. Dabei sollen HRS-Komponenten so ausgelegt werden, dass sich beim Betrieb der HRS möglichst geringe LCOH<sub>2</sub> ergeben. Die zu verändernden Größen (beispielsweise Elektrolyseleistung und Wasserstoffspeicherkapazität) werden Entscheidungsvariablen genannt.

Das Verfahren macht sich die Grundkonzepte der Evolutionstheorie (Selektion, Rekombination, Mutation) zunutze, um eine schrittweise Annäherung an das Optimum oder die Optima zu erreichen. Es werden sogenannte Individuen definiert, indem jedem Individuum Werte für die Entscheidungsvariablen als Eigenschaften zugewiesen werden. Ein Individuum könnte also als Eigenschaften eine hohe Elektrolyseleistung und eine geringe Speicherkapazität, ein anderes eine geringe Elektrolyseleistung und geringe Speicherkapazität aufweisen. Dazu werden stets mehrere Individuen betrachtet, die eine sogenannte Generation bilden. Alle Individuen einer Generation werden

### 3. Literaturanalyse und vorangegangene Arbeiten

hinsichtlich ihrer jeweiligen Güte bewertet. Im Beispiel bedeutet dies, dass die resultierenden Wasserstoffgestehungskosten für jedes Individuum bestimmt werden. Nachdem die Individuen evaluiert wurden, werden aus den besten Individuen neue gebildet, indem deren Eigenschaften zufällig kombiniert und anschließend zufällig verändert (mutiert) werden. Die neuen Individuen bilden die zweite Generation, die ebenfalls evaluiert wird. Dieses Verfahren wird so lange wiederholt, bis die Ergebnisse konvergieren und das Optimum hinreichend gut angenähert ist. Das Verfahren erlaubt eine Mehrzieloptimierung, sodass sich nicht ein Optimum bildet, sondern mehrere Optima entstehen. Diese bilden die sogenannte Pareto-Front und stellen jeweils unterschiedlich ausgeprägte Kompromisse hinsichtlich der Ziele dar (siehe Abbildung 3.1).

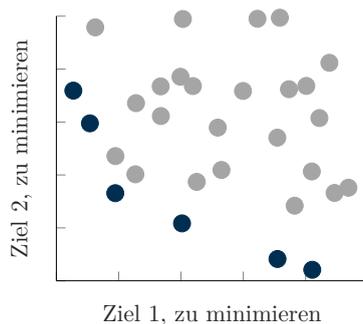


Abbildung 3.1.: Beispielhaftes Optimierungsergebnis. Mögliche Lösungen (alle Punkte) und ihre Bewertung hinsichtlich zweier Zielgrößen (zu minimieren) sowie Punkte der Pareto-Front (blau)

Das Verfahren kann auf unterschiedliche Probleme angewendet werden, indem die Entscheidungsvariablen und die jeweilige Evaluationsfunktion verändert werden.

#### 3.5.3. Modelle der Komponenten einer Wasserstofftankstelle

Das in dieser Arbeit verwendete Modell einer Wasserstofftankstelle besteht aus mehreren Komponentenmodellen, erstellt in der Programmierumgebung MATLAB [109]. Diese Modelle sind, abgesehen vom Modell des Elektrolyseurs, im Rahmen dieser Arbeit oder assoziierten Abschlussarbeiten entstanden.

##### Elektrolyseur

Das Modell eines alkalischen Elektrolyseurs wurde im Rahmen des Projekts H2BER entwickelt. Es ist im Abschlussbericht [107] ausführlich beschrieben. Grundlage des Modells sind physikalische und elektro-chemische Gleichungen, sodass auf die Verwendung von starren Kennfeldern verzichtet werden kann. Die Zellspannung setzt sich im Modell aus der idealen reversiblen Spannung, der Aktivierungsüberspannung sowie

### 3.5. Vorangegangene Arbeiten zu Modell- und Simulationsgrundlagen

einer ohmschen Überspannung zusammen. Jede dieser Teilspannungen wird gesondert berechnet. Das Modell ist nicht-linear und bildet auch das thermische Verhalten ab. Es wird davon ausgegangen, dass alle Bestandteile des Elektrolyseurs die gleiche Temperatur aufweisen. Wärmeübergänge zwischen verschiedenen Bauteilen werden demnach nicht modelliert. Die Parameter entsprechen denen des im Projekt betrachteten, existierenden Elektrolyseurs mit etwa 454 kW Nennleistung und der Möglichkeit eines Überlastbetriebs. Die beiden Parameter maximale Austauschstromdichte sowie Dicke der Elektrolytschicht konnten nicht gemessen werden. Sie wurden so eingestellt, dass das Verhalten des Modells zu den Messdaten des realen Elektrolyseurs passt. Peripherie wie Gasreinigung und -trocknung wurde nicht modelliert, sondern wird mit einem konstanten Wirkungsgrad abgebildet.

#### **Wasserstoffverdichter**

Es wird ein Modell eines Kolbenverdichters für Wasserstoff verwendet. Dieses ist angelehnt an den Verdichter Linde IC90 und wurde im Rahmen einer Masterarbeit entwickelt [40]. Es nimmt polytropes Verdichterverhalten an (der polytrope Exponent wird zu 1,4 angenommen) und berechnet die thermodynamischen Eigenschaften von Wasserstoff anhand der Redlich-Kwong-Zustandsgleichung. Der modellierte Verdichter verfügt über fünf sequentielle Verdichterstufen, die im Modell jedoch nicht abgebildet werden. Hier werden alle Stufen zu einem Verdichtungsprozess zusammengefasst. Der maximale Massenstrom beträgt  $33,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ .

#### **Wasserstoffdruckspeicher**

Das Wasserstoffdruckspeichermodell wurde ebenfalls im Rahmen dieser Masterarbeit erstellt [40]. Das Modell berechnet den Speicherdruck in Abhängigkeit der ein- beziehungsweise ausgespeicherten Wasserstoffmasse je Zeitschritt mit Hilfe der Redlich-Kwong-Zustandsgleichung.

#### **Windenergieanlage**

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten WEA-Modell handelt es sich um eine skalierbare Leistungszeitreihe. Das heißt, die WEA selbst und ihre Eigenschaften werden nicht modelliert, sondern es werden Leistungsmessdaten eines realen Windparks mit etwa 50 MW Nennleistung verwendet [111]. Diese liegen in minütlicher Auflösung vor und können beliebig aggregiert und skaliert werden.

#### **Strommarkt**

In dieser Arbeit wird angenommen, dass die HRS Strom unter anderem aus dem öffentlichen Stromnetz beziehen kann. Zusätzlich soll die WEA gegebenenfalls Energie in das Stromnetz einspeisen können. Da es sich bei der HRS um eine Industrieanlage mit hohem Jahresenergieverbrauch handelt, können diese Energiemengen an einem

### 3. Literaturanalyse und vorangegangene Arbeiten

Markt gehandelt werden. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass der HRS-Betreiber am kontinuierlichen Intradayhandel teilnimmt. Für eine solche Marktteilnahme bestehen organisatorische, betriebswirtschaftliche und technische Anforderungen, deren Erfüllung mit Kosten verbunden sind [112]. Alternativ kann der Handel über einen Dienstleister erfolgen. In dieser Arbeit werden damit verbundene Kosten vernachlässigt. Der Intradayhandel findet ab 15 Uhr des Vortages bis 30 min vor Erfüllung statt. Es können Viertelstundenpakete im Pay-As-Bid-Verfahren gehandelt werden. Im Modell wird vereinfachend angenommen, dass auch zum Erfüllungszeitpunkt gehandelt werden kann. Es werden Preisdaten des Jahres 2015 für einen gewichteten 15-Minuten-Mittelwert verwendet [113]. Dieses Modell wurde im Rahmen des Projekts H2BER entwickelt [107] und um eine Prognosefunktionalität erweitert, die in der vorliegenden Arbeit nicht verwendet wird. Abweichend zu diesem Modell werden die Preisdaten in dieser Arbeit skaliert, damit sie zum Jahr 2017 kongruent sind. Dazu werden gewichtete Day-Ahead-Preis-Mittelwerte der Monate Januar bis einschließlich Juni 2017 [113] verwendet.

#### Zapfsäule

Das Modell der Zapfsäule ist vereinfacht und bildet den Energiebedarf der Wasserstoffkühlung ab. Dieser wird zu  $2,25 \frac{\text{kWh}}{\text{h}}$  im Standby und  $0,4 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$  angenommen [114].

#### 3.5.4. Zusammenfassung von Kapitel 3.5

In diesem Kapitel wurden die in dieser Arbeit verwendeten Simulationsmodelle und Optimierungsverfahren vorgestellt, die sich wie folgt zusammenfassen lassen:

- Das verwendete Simulationsframework erlaubt die modulare Kombination nicht-linearer Komponentenmodelle und die energetische Simulation. So lässt sich eine Wasserstofftankstelle modellieren und der Tankstellenbetrieb simulieren.
- Für verschiedene in dieser Arbeit behandelte Optimierungsprobleme wird ein Genetischer Algorithmus verwendet, der auch in Kombination mit dem Simulationsframework eingesetzt werden kann.
- Es bestehen Teilmodelle für alle relevanten Komponenten einer Wasserstofftankstelle samt Elektrolyse. Darüber hinaus kann auf Modelle für Windenergieanlagen und den Strommarkt zurückgegriffen werden.

## 4. Nicht-lokale und lokale Nachfrager von Wasserstoff als Kraftstoff

Diese Arbeit betrachtet FCEV-Flottenfahrzeuge als erste Nachfrager von Wasserstoff als Kraftstoff in der Initialphase des Infrastrukturaufbaus. In diesem Kapitel werden für verschiedene Flottentypen Nachfrageprofile generiert und Anforderungen an Tankinfrastruktur bestimmt. Auf Basis dieser Nachfrageprofile erfolgt in Kapitel 5 eine Auslegung von HRS. Die Anforderungen an Tankinfrastruktur fließen als Randbedingung für die Auslegung eines HRS-Netzwerks in Kapitel 6 ein (siehe Abbildung 4.1).

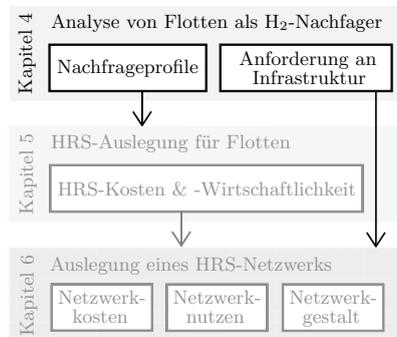


Abbildung 4.1.: Verknüpfung des Kapitels 4 mit den übrigen Kapiteln

Flottenfahrzeuge, beispielsweise Busse oder Taxis, erfordern keine flächendeckende, sondern nur lokal verfügbare Tankinfrastruktur, da sie nur in einem lokal begrenzten Gebiet eingesetzt werden. Sie erzeugen damit ausschließlich dort eine Kraftstoffnachfrage, die außerdem regelmäßig auftritt. Teilweise kann sie sogar präzise vorhergesagt werden (zum Beispiel bei Bussen), bei anderen Fahrzeugtypen ist das nur grob möglich (zum Beispiel bei Taxis). Der Aufbau einer Flotte, die groß genug ist, eine Wasserstofftankstelle auszulasten, erfordert für derartige Nachfrager die Koordination nur weniger Akteure. Diese Nachfrage-Typen werden im Folgenden als lokale Nachfrager bezeichnet. Als solche fließen Busse, Taxis und Carsharing-Fahrzeuge in die Untersuchung ein. Busse und Taxis werden auch in der Literatur als mögliche erste Anwendungen für Wasserstoff als Kraftstoff identifiziert [38], [56], [63], [106]. Eine ausführliche Diskussion der Literatur erfolgte in Kapitel 3.1.

#### 4. Nicht-lokale und lokale Nachfrager von Wasserstoff als Kraftstoff

Es gibt weitere Fahrzeuge und Einsatzzwecke, die ebenfalls die oben genannten Kriterien erfüllen, hier aber nicht betrachtet werden. Dazu zählen Sonderfahrzeuge (zum Beispiel Fahrzeuge der Müllabfuhr), Güterverkehr mit LKW oder leichten Nutzfahrzeugen, Bring- und Lieferdienste sowie PKW-Fuhrparks von Unternehmen mit einem anderen Geschäftszweck als Güter- oder Personentransport. Zusätzlich können auch schienengebundene Fahrzeuge lokale Nachfrager darstellen. Eine Betrachtung, die alle genannten, möglichen lokalen Nachfrager berücksichtigt, würde den Umfang dieser Arbeit übersteigen. Die oben genannte Auswahl der betrachteten Fahrzeug- und Anwendungstypen begründet sich erstens mit einer verhältnismäßig guten Datenverfügbarkeit zu Fahrzeugbestand, Kraftstoffverbrauch und Tankverhalten. Zweitens finden sich diese Anwendungsfälle in vielen Städten und Gebieten wieder und bieten somit eine gute Übertragbarkeit. Drittens verbindet alle ausgewählten Anwendungen, dass sie Privatpersonen transportieren und diese so in Kontakt mit FCEV bringen. Die Fahrgäste beziehungsweise Fahrer können auf diese Weise Erfahrungen mit FCEV sammeln. Eine mögliche (spätere) Entscheidung für den Kauf eines privaten FCEV wird somit unterstützt.

Kapitel 4.1 geht auf private, nicht-lokale Wasserstoffnachfrage ein und beschreibt, wie für diese Untersuchung Tanklastgänge erzeugt werden. In den Kapiteln 4.2, 4.3 und 4.4 wird auf Busse, Taxis und Carsharing-Fahrzeuge als lokale Nachfrager näher eingegangen. Diese Abschnitte beschreiben zunächst die Besonderheiten des jeweiligen Flottentyps. Dann wird die Modellierung des jeweiligen Tankverhaltens sowie des Infrastrukturbedarfs behandelt. Die damit gewonnenen Zeitreihen zum Tankverhalten sind für die Untersuchungen zur Auslegung von Wasserstofftankstellen in Kapitel 5 erforderlich, während die jeweiligen Anforderungen an Tankinfrastruktur in Kapitel 6 für die Auslegung eines HRS-Netzwerks verwendet werden.

### 4.1. Private PKW als nicht-lokale Nachfrager

In diesem Kapitel wird auf private PKW als zukünftige, nicht-lokale Nachfrager nach Wasserstoff als Kraftstoff eingegangen (siehe Kapitel 4.1.1). Es wird darüber hinaus eine Methodik zur Modellierung der Kraftstoffnachfrage beschrieben (siehe Kapitel 4.1.2).

#### 4.1.1. Beschreibung und Anforderungen an Infrastruktur

In Deutschland waren zum 01.01.2017 45,8 Mio. PKW zugelassen, davon befinden sich 89,5 % in privater Hand [115]. Auf PKW mit Dieselmotor entfallen 32,9 % der Zulassungen (29,0 % für private Fahrzeuge), während 65,5 % mit einem Benzinmotor angetrieben werden (69,4 % für private Fahrzeuge). Der Bestand an FCEV am 01.01.2017 betrug 211 PKW [33]. Private PKW werden vorzugsweise in der Nähe des Zuhauses oder auf dem Weg zu einem Fahrtziel betankt (siehe auch Kapitel 3.4.1).

#### 4.1. Private PKW als nicht-lokale Nachfrager

Sie werden jedoch zumeist nicht ausschließlich in einer Stadt oder einem abgegrenzten Gebiet betrieben, sondern sollen auch längere Strecken zurücklegen können. Dies erfordert ein flächendeckendes Netz an Tankstellen in Deutschland. Tankorte und -zeitpunkte einzelner Fahrzeuge folgen im Allgemeinen keinen definierten Regeln oder Mustern. Auch bedingt der Aufbau einer größeren Flotte die Mitwirkung vieler einzelner Stakeholder. Für Betreiber von HRS stellen private PKW somit keine planbaren und lokalen Nachfrager dar. Gleichwohl ist die Versorgung privater PKW mit Wasserstoff ein wesentliches Ziel des Infrastrukturaufbaus. Jetzt errichtete HRS sollen auch ersten privaten Anwendern nützen. Um zukünftigen Anforderungen an Wasserstofftankinfrastruktur gerecht zu werden, wurden verschiedene Tankstellenklassen definiert [116] (siehe Tabelle 4.1). Diese beinhalten unter anderem eine angenommene Betankungsdauer sowie die Dauer der Handhabung (Handling Time) von jeweils 3 Minuten. Die zugelassene Wartezeit zwischen zwei Tankvorgängen ist abhängig von der Tankstellenklasse. Als Back-to-back-Betankung werden unmittelbar aufeinander folgende Tankvorgänge bezeichnet. Da PKW Wasserstoff bei einem Druck von 700 bar speichern, sind tankstellenseitig ein Speicherdruckniveau von 1000 bar und eine Kühlung erforderlich. Diese kühlt den Wasserstoff auf bis zu 233 K ab, damit der durch den Joule-Thompson-Effekt und die Verdichtung im Fahrzeugtank bedingte Temperaturanstieg des Tanks auf 358 K begrenzt wird [117].

Tabelle 4.1.: Ausgewählte Eigenschaften der HRS-Klassen gemäß H2 Mobility [116]

	Tankstellenklasse			
	Very small	Small	Medium	Large
Anzahl Zapfsäulen	1	1	2	4
Max. Anzahl Tankvorgänge pro Zapfsäule und Stunde	2,5	6	6	10
Max. Anzahl Back-to-back-Betankungen	0	1	1	10
Wartezeit zwischen Tankvorgängen in min	20	5	5	0
Durchschnittliche Anzahl Tankvorgänge pro Tag	10	30	60	125
Max. Anzahl Tankvorgänge pro Tag	20	38	75	180
Max. Absatz in kg/h	18	33,6	67,2	224
Durchschnittlicher Absatz in kg/d	56	168	336	700
Max. Absatz in kg/d	80	212	420	1000

### 4.1.2. Modellierung des Tankverhaltens

Die hier beschriebene Methodik zur Modellierung des Tankverhaltens wurde unter anderem im Projekt H2BER [107] angewendet. Da sie im Abschlussbericht jedoch kaum beschrieben wurde, wird sie im Folgenden ausführlich vorgestellt.

In dieser Arbeit wird angenommen, dass die private Nachfrage nach Wasserstoff als Kraftstoff grundsätzlich gering ist. Deshalb wird davon ausgegangen, dass Wasserstofftankstellen nur der Tankstellenklasse „Very small“ genügen müssen [116]. Der zu erzeugende Tanklastgang beruht daher auf den Parametern dieser Tankstellenklasse (siehe Tabelle 4.1). Diese gibt jedoch nicht die zeitliche Verteilung von Tankvorgängen vor, sodass für diese Untersuchung zusätzlich Informationen zur Wahrscheinlichkeitsverteilung von Tankvorgängen verwendet werden. Da derartige Daten nicht öffentlich verfügbar sind, wird auf Messdaten zweier konventioneller Tankstellen zurückgegriffen [118]. Mit Hilfe von Daten zum Inlandsverbrauch von Kraftstoff in Deutschland [119] lässt sich ein saisonal unterschiedliches Tankverhalten erkennen.

Im ersten Schritt wird aus diesen Daten [119] eine relative Tankhäufigkeit je Monat eines Jahres erzeugt. Dazu wird der Inlandsverbrauch von Benzin in den Jahren 2012 bis 2015 herangezogen. Der Dieselabsatz wird nicht betrachtet, da in den Daten nicht zwischen PKW- und LKW-Kraftstoff unterschieden wird. Der Verbrauch in jedem Monat wird durch die Anzahl der Tage im jeweiligen Monat geteilt, um den Verbrauch pro Tag zu erhalten. Für jedes der Betrachtungsjahre wird der durchschnittliche Verbrauch je Tag monatsweise durch die Summe der durchschnittlichen Verbräuche pro Tag geteilt. Das Ergebnis stellt somit eine Wahrscheinlichkeit dar, mit der ein Tankvorgang in einem bestimmten Monat stattfindet — bereinigt um die unterschiedliche Anzahl an Tagen pro Monat. Aus diesen Werten lässt sich nun monatsweise ein Mittelwert aus den Betrachtungsjahren ableiten. Gemeinsam bilden diese die saisonale Tankwahrscheinlichkeit ab (siehe Abbildung 4.2).

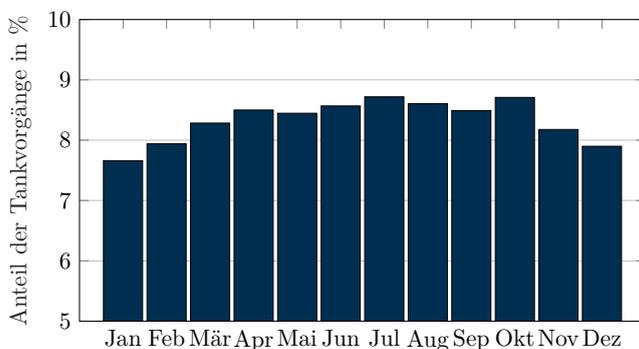


Abbildung 4.2.: Saisonale Tankwahrscheinlichkeit (korrigiert um die Anzahl der Tage je Monat)

Im zweiten Schritt wird für jede Stunde einer Woche eine Wahrscheinlichkeit für einen Tankvorgang bestimmt. Dazu werden die Daten zweier Tankstellen verwendet, die für einen Zeitraum von zwei Wochen vorliegen [118]. Diese beschränkte Datengrundlage begrenzt folglich die Aussagekraft. Die Daten sind vertraulich und können daher hier nicht dargestellt werden. Sie enthalten die Anzahl von Tankvorgängen von Diesel- und Benzin-PKW in jeder Stunde eines Betrachtungszeitraums von zwei Wochen. Es wird nicht zwischen gewerblichen und privaten PKW unterschieden, LKW-Betankungen sind jedoch gesondert ausgewiesen. Daher wird angenommen, dass die zeitliche Verteilung von Tankvorgängen für private und gewerbliche PKW identisch ist. Die Werte für beide Messzeiträume (jeweils eine Woche) werden addiert. Dann werden die Tankvorgänge stundenweise getrennt für Diesel und Benzin durch die Gesamtanzahl an Tankvorgängen geteilt. So ergeben sich relative Tankhäufigkeiten getrennt für Diesel und Benzin. Über die jeweiligen Anteile der Benzin- und Diesel-PKW am Fahrzeugbestand zur Zeit der Datenerhebung erfolgen eine Gewichtung der zuvor bestimmten relativen Tankhäufigkeiten und eine anschließende Zusammenfassung. Die sich ergebenden relativen Tankhäufigkeiten je Stunde der Woche sind in Abbildung 4.3 dargestellt.

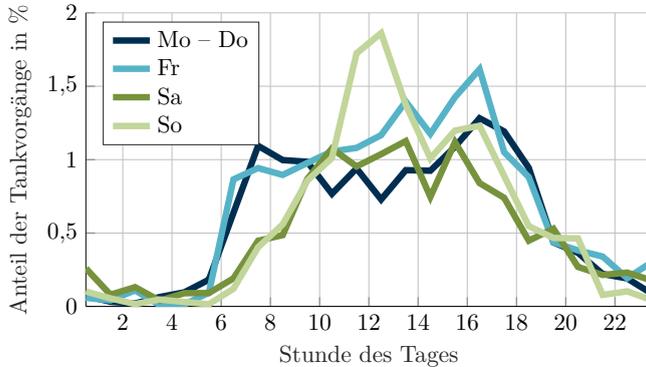


Abbildung 4.3.: Stündliche Tankwahrscheinlichkeit (Mittelwert für Mo – Do)

In einem dritten Schritt wird die Gesamtzahl an Tankvorgängen pro Jahr  $n_{TV, a}$  aus dem Produkt der durchschnittlichen Anzahl an Tankvorgängen pro Tag gemäß Tankstellenklasse (10) und der Anzahl an Tagen des Betrachtungszeitraums bestimmt. Es soll eine Zeitreihe für ein Jahr erzeugt werden, deshalb umfasst der Betrachtungszeitraum 365 Tage. Jeder Tankvorgang  $TV \in \{1 \dots n_{TV, a}\}$  wird mit einem stochastischen Verfahren gemäß der zuvor bestimmten saisonalen Tankwahrscheinlichkeit einem Monat des Betrachtungszeitraums zugeordnet. Es wird sichergestellt, dass keinem Monat mehr Tankvorgänge zugewiesen werden als gemäß Tankstellenklasse zulässig ist (maximale Anzahl an Tankvorgängen pro Tag  $n_{TV, d, \max}$  multipliziert mit der Anzahl an Tagen des jeweiligen Monats).

#### 4. Nicht-lokale und lokale Nachfrager von Wasserstoff als Kraftstoff

Im vierten Schritt wird jeder Monat des zu modellierenden Zeitraums betrachtet und die ihm zugewiesenen Tankvorgänge werden auf die Tage des Monats aufgeteilt. Dies geschieht auf Basis der in Schritt zwei ermittelten relativen Tankhäufigkeiten je Stunde der Woche, die dafür wochentagsweise zusammengefasst werden. Da es sich um ein stochastisches Verfahren handelt, kann es passieren, dass die Anzahl der Tankvorgänge an einem Tag das in der Tankstellenklasse festgelegte Maximum von 20 Tankvorgängen überschreitet. In diesem Fall werden diese Tankvorgänge gemäß der Wahrscheinlichkeitsverteilung auf andere Tage des Monats verteilt. Auf diese Weise kann es passieren, dass die vorgegebene Wahrscheinlichkeitsverteilung verzerrt abgebildet wird, die festgelegten Grenzen der Tankstellenklasse werden jedoch eingehalten.

Anschließend wird jeder Tag einzeln betrachtet und jedem Tankvorgang des jeweiligen Tages eine zu vertankende Wasserstoffmasse  $m_{TV}$  zugewiesen. Es werden zufällige Werte so gewählt, dass sich näherungsweise eine Normalverteilung um die durchschnittliche Masse eines Tankvorgangs  $m_{TV, avg}$  ergibt und gilt:

$$m_{TV, min} \leq m_{TV} \leq m_{TV, max} \quad (4.1)$$

$$m_{TV, min} = 2m_{TV, avg} - m_{TV, max} \quad (4.2)$$

Dabei ist  $m_{TV, max}$  die maximal pro Tankvorgang abzugebende Masse gemäß Tankstellenklasse.  $m_{TV, avg}$  kann durch Division der durchschnittlich abzugebenden Masse pro Tag und der durchschnittlichen Anzahl an Tankvorgängen pro Tag ermittelt werden. Dieser Wert beträgt in allen Klassen 5,6 kg. Er ergibt sich auch, wenn die maximal pro Tag abzugebende Masse durch die maximale Anzahl an Tankvorgängen pro Tag geteilt wird. Lediglich in der Klasse „Very small“ entsteht eine Inkonsistenz, da das Ergebnis hier 4,0 kg beträgt. Deshalb wird für diese Klasse für jeden Tag ein individueller Wert für  $m_{TV, avg}$  gemäß folgender Gleichungen gewählt:

$$m_{TV, avg} = \max(m_{TV, avg}^{\max}, m_{TV, avg}^{\max} + (m_{TV, avg}^{\text{avg}} - m_{TV, avg}^{\max})r_n) \quad (4.3)$$

$$r_n = \frac{n_{TV, d} - n_{TV, d, avg}}{n_{TV, d, max} - n_{TV, d, avg}} \quad (4.4)$$

$$m_{TV, avg}^{\max} = \frac{m_{TV, d, max}}{n_{TV, d, max}} \quad (4.5)$$

$$m_{TV, avg}^{\text{avg}} = \frac{m_{TV, d, avg}}{n_{TV, d, avg}} \quad (4.6)$$

mit

- $m_{TV, d, \max}$  = Maximal abzugebende Masse pro Tag gemäß Klasse
- $m_{TV, d, \text{avg}}$  = Durchschnittlich abzugebende Masse pro Tag gemäß Klasse
- $n_{TV, d}$  = Anzahl der Tankvorgänge des jeweiligen Tages
- $n_{TV, d, \text{avg}}$  = Durchschnittliche Anzahl Tankvorgänge pro Tag gemäß Klasse
- $n_{TV, d, \max}$  = Maximale Anzahl Tankvorgänge pro Tag gemäß Klasse

Bei der Zuweisung von Massen zu einzelnen Tankvorgängen kann es passieren, dass die maximal pro Tag abzugebende Wasserstoffmasse gemäß Tankstellenklasse überschritten wird. In diesem Fall findet solange eine erneute Zuordnung von Massen auf die Tankvorgänge eines Tages statt, bis der Grenzwert eingehalten wird.

Danach werden alle Tankvorgänge eines Tages, genauer gesagt deren Beginn, stochastisch auf die Minuten des Tages verteilt. Dazu wird die stundenweise Wahrscheinlichkeitsverteilung angewendet, indem angenommen wird, dass die Wahrscheinlichkeit innerhalb einer Stunde konstant ist. Bei der Zuordnung jedes einzelnen Tankvorgangs werden Tankdauer, Handling Time und Wartezeit ebenfalls zeitlich erfasst. Es wird dann geprüft, ob es eine Überschneidung mit einem bereits zugeordneten Tankvorgang, der Handling Time oder der Wartezeit zwischen zwei Tankvorgängen gibt. Außerdem wird ermittelt, ob die zuvor erwähnten Grenzwerte der Tankstellenklasse (maximale Masse pro Stunde oder Tag, maximale Anzahl an Tankvorgängen pro Stunde) verletzt werden. Falls die Zuordnung des Tankvorgangs aus einem dieser Gründe ungültig ist, wird sie wiederholt. Durch derartige Wiederholungen kann es zu Verzerrungen der zuvor ermittelten Wahrscheinlichkeitsverteilung kommen, die Grenzwerte der Tankstellenklasse bleiben jedoch gewahrt. Abschließend werden aus der Zuordnung der Tankvorgänge Zeitreihen in stündlicher Auflösung erstellt. In Abbildung 4.4 ist beispielhaft ein solcher Lastgang entsprechend der Klasse „Very small“ für eine Woche dargestellt. Durch die stochastische Verteilung ergibt sich im erzeugten Lastgang für die Klasse „Very small“ mit  $52,6 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$  eine geringere durchschnittliche abgegebenen Wasserstoffmasse pro Tag als in der Klasse vorgesehen ( $56,0 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$ ).

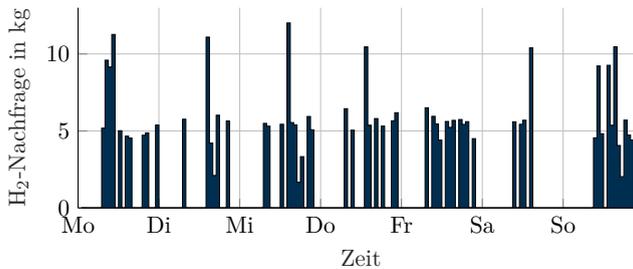


Abbildung 4.4.: Wasserstoffnachfrage (Klasse „Very small“) in einer Beispielwoche

## 4.2. Busse als lokale Nachfrager

In diesem Kapitel wird erläutert, inwiefern Busse als lokale Nachfrager verstanden werden können und wie hoch das Potential für den Einsatz von mit Wasserstoff betriebenen Bussen im Betrachtungsgebiet ist. Anschließend wird der Infrastrukturbedarf beschrieben, eine Methodik zur Modellierung der Wasserstoffnachfrage durch Busse dargestellt und ein Kostenvergleich aufgestellt.

### 4.2.1. Beschreibung

Busse bedienen in Städten ein begrenztes Gebiet und kehren nach der letzten Fahrt eines Tages in ein Busdepot zurück. Dort werden sie häufig nicht nur geparkt, sondern auch gereinigt, gewartet und betankt. In einigen Städten gibt es mehr als ein Busdepot. Die Busse fahren gemäß einem Fahrplan, wobei Fahrzeuge nicht zwangsläufig jeden Tag auf derselben Linie eingesetzt werden. Busse stellen somit planbare und lokal begrenzte Nachfrager dar und eignen sich deshalb besonders als erste Anwendungen für Wasserstoff als Kraftstoff. Üblicherweise nutzen Busse Diesel als Kraftstoff. Zum 01.01.2017 waren etwa 77 000 Diesibusse (entsprechend über 97 %) und knapp 1300 Erdgasbusse in Deutschland zugelassen [115]. Einige Städte streben an, ihre Busflotte auf nachhaltige Antriebskonzepte umzustellen. Dazu zählen zum Beispiel London, Hamburg, Köln und Berlin. London wird ab dem Jahr 2018 Doppel-Decker-Busse nur noch als Hybrid, BEV-Bus oder FCEB beschaffen. Bis 2020 sollen alle Ein-Decker-Busse emissionsfrei sein [120]. Hamburg und Berlin beabsichtigen, gemeinsam etwa 200 emissionsfreie Busse pro Jahr zu beschaffen [121]. Neben batterieelektrischen Fahrzeugen kommen FCEB zum Einsatz. Die Regionalverkehr Köln GmbH wird ab 2019 schrittweise 30 FCEB in die Flotte aufnehmen [122]. In Deutschland waren zum 01.01.2017 15 FCEB [123] und 168 BEV-Busse [115] zugelassen. Hersteller von FCEB sind beispielsweise Van Hool, Toyota und Solaris. In der Vergangenheit wurden auch Wasserstoffbusse mit Verbrennungsmotor erprobt, beispielsweise im Rahmen des Projekts HyFleet: CUTE von 2006 bis 2009 in Berlin [124]. Diese Technologie ist jedoch unter anderem hinsichtlich Kraftstoffverbrauch, Reichweite und Lärmemissionen FCEB unterlegen und spielt deshalb in Deutschland gegenwärtig keine Rolle. Daher wird sie im Folgenden nicht weiter betrachtet.

### 4.2.2. Anforderungen an Infrastruktur

Busse erfordern Tankmöglichkeiten nur in der Stadt, in der sie eingesetzt werden. Üblicherweise werden Busse im Depot an einer eigens dafür errichteten Tankstelle betankt. Entsprechend besteht die Erwartung von Busbetreibern, dass auch FCEB im Depot betankt werden. In Pilotprojekten werden FCEB jedoch auch an öffentlichen Tankstellen außerhalb des Depots betankt (zum Beispiel in Hamburg [125]).

Wenn diese Tankstellen weit vom Depot entfernt sind, erschwert dies den Betriebsablauf. Es ist jedoch denkbar, öffentliche Tankstellen in unmittelbarer Nähe zum Busdepot auch für die Busbetankung zu nutzen. Hier wären die Einschränkungen des Betriebsablaufs gering. Deshalb wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass entweder Tankstellen auf dem Gelände von Busdepots oder öffentliche Tankstellen in unmittelbarer Nähe zum Busdepot geeignete Tankmöglichkeiten für Busflotten mit bis zu zehn Fahrzeugen darstellen. Diese Option wird auch in der Studie NewBus-Fuel [44] als geeignet für Busflotten mit weniger als zehn Fahrzeugen erwähnt. Als unmittelbare Nähe wird in dieser Arbeit ein Abstand von 1667 m entsprechend etwa 10 Minuten Fahrtzeit (bei einer angenommenen Durchschnittsgeschwindigkeit von 10 km/h und Luftlinienentfernung [126]) angesehen.

Die meisten gegenwärtig erhältlichen FCEB speichern Wasserstoff bei einem Druckniveau von 350 bar. Wenige Modelle, beispielsweise der Toyota Sora, verwenden PKW-Komponenten und somit einen Speicher mit einem Maximaldruck von 700 bar. Wegen der Marktrelevanz werden in dieser Arbeit für Busse ein maximaler Speicherdruck von 350 bar und ein dafür erforderlicher Speicherdruck auf Tankstellenseite von 500 bar angenommen. Entsprechend sind nicht alle Tankstellenkomponenten für PKW-Tankstellen kompatibel mit den Anforderungen der Busse. Die betrachtete Wasserstoffversorgung mittels Onsite-Elektrolyse kann Wasserstoff sowohl für die Versorgung von PKW als auch von Bussen herstellen. Die übrigen für die Busbetankung notwendigen Komponenten könnten teilweise ebenfalls für PKW genutzt werden. Dazu zählt der Verdichter, wenn sein maximales Druckniveau auch für die PKW-Betankung ausreicht (bis zu 1000 bar). Auch die Speicher mit einem Druckniveau von höchstens 500 bar können als eine Kaskadenstufe für die PKW-Betankung genutzt werden. Umgekehrt können Speicher für die PKW-Betankung auch für die Busbetankung genutzt werden. In einer Masterarbeit [40] wurde untersucht, welches Potential sich zur Senkung des Energieaufwands ergibt, wenn ein weiterer Speicher (zum Beispiel der für die Busbetankung vorgesehene Mitteldruckspeicher (MDS)) die PKW-Betankung unterstützt. Dieser Speicher hätte laut [40] idealerweise einen maximalen Speicherdruck von etwa 400 bar und ein Volumen von  $0,4\text{ m}^3$ . Übliche Speicher für die Busbetankung könnten hinsichtlich des Druckniveaus diese Rolle also übernehmen. Damit ließe sich der Energieaufwand für die Verdichtung um etwa 8 % verringern. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch dieses Synergiepotential nicht berücksichtigt und davon ausgegangen, dass MDS nur Bussen zugeordnet und Hochdruckspeicher (HDS) nur PKW zugeordnet werden. Der NDS hingegen kann für beide Nachfrager genutzt werden.

Der Betankungsvorgang von FCEB ist in der Norm SAE J2601-2 [43] geregelt. Verschiedene Betankungsgeschwindigkeiten mit Wasserstoffmassenströmen von bis zu 120 g/s sind vorgesehen, während das Protokoll für PKW-Betankung [42] maximal 60 g/s erlaubt. Füllkupplungen und Zapfsäulen für Busse sind unter anderem deshalb nicht kompatibel mit denen für PKW. Es wird keine Kühlung des Wasserstoffs benötigt, da durch die — verglichen mit PKW — geringeren Drücke im Fahrzeugtank keine so starke Erwärmung des Kraftstoffs beim Tankvorgang bedingen. Deshalb wird

in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die Wasserstoffkühlung nur zur Versorgung von PKW erforderlich ist und Busse beziehungsweise PKW jeweils eigene Zapfsäulen benötigen.

### 4.2.3. Modellierung des Tankverhaltens

Wie in Kapitel 3.2.1 dargestellt, bietet die Literatur keine für diese Arbeit verwendbaren Modelle für zeitlich aufgelöste Wasserstoffnachfrage durch Busse. Um das Tankverhalten von FCEB zu modellieren, wird deshalb auf Daten einer existierenden, konventionellen Busflotte zurückgegriffen. Diese liegen für einen Tag vor und beziehen sich auf eine Stadt mit etwa 170 000 Einwohnern. Obwohl in dieser Arbeit Städte unterschiedlicher Größe betrachtet werden, wird angenommen, dass das Fahr- und Tankverhalten der Busse sich nicht von dem der den Daten zugrundeliegenden Flotte unterscheidet. Die Daten enthalten Depot-Ein- und -Ausfahrzeiten zu jedem Bus sowie die jeweils zurückgelegte Strecke. Die Flotte besteht aus 12 m- und 18 m-Bussen. Für die Modellierung werden ausschließlich 18 m-Busse herangezogen, da 12 m-Busse nach Aussage des Betreibers durch batterieelektrische Fahrzeuge ersetzt werden können und diese Option bevorzugt wird. Die 18 m-Busse weisen größere täglich zurückgelegte Strecken und einen höheren Energiebedarf auf, sodass batterieelektrische Fahrzeuge für diese Anwendungsfälle weniger geeignet sind. Für diese Arbeit wird die maximale Flottengröße auf zehn Fahrzeuge begrenzt. Diese legen laut Daten pro Tag jeweils Strecken zwischen 328 km und 434 km zurück.

Im ersten Schritt werden jeder Minute eines Tages Wahrscheinlichkeiten des Tankbeginns jedes Busses zugeordnet. Es wird angenommen, dass der Tankvorgang spätestens 15 Minuten vor Abfahrt aus dem Depot begonnen werden muss. Die Wahrscheinlichkeit ist in der Minute der Ankunft (laut Daten) am höchsten und nimmt bis zum spätestmöglichen Zeitpunkt des Tankbeginns linear ab. In der Minute der Ankunft des Busses im Depot wird die Wahrscheinlichkeit verdoppelt und bis 30 Minuten danach konstant gehalten. So soll abgebildet werden, dass ein Bus möglichst unmittelbar nach der Ankunft betankt werden sollte – sofern eine Zapfsäule verfügbar ist. Ergebnis dieses Schritts sind modellhafte Tankwahrscheinlichkeiten für jede Minute eines Tages für jeden der ausgewählten 18 m-Busse sowie deren jeweilige Tagesfahrstrecke.

Im zweiten Schritt werden mehrere Annahmen getroffen. Der Kraftstoffverbrauch der Busse wird mit 12,1 kg/100 km gemäß dem Ergebnisbericht des CHIC-Projekts [34] angenommen. Da keine detaillierteren Daten vorliegen, wird davon ausgegangen, dass der Kraftstoffverbrauch keinen saisonalen Schwankungen unterliegt. Im tatsächlichen Betrieb ist hingegen davon auszugehen, dass es zu saisonalen Abweichungen kommt, da Nebenaggregate (insbesondere Klimatisierung und Heizung) abhängig von der Außentemperatur unterschiedlich viel Energie benötigen. Dieser Energieaufwand ist somit wie die Außentemperatur in jedem Jahr und Ort unterschiedlich. Außerdem wird angenommen, dass die Tagesfahrleistung jedes Busses an Wochenenden

(Samstag und Sonntag) nur halb so groß ist wie an Wochentagen, da der Fahrplan an Wochenenden üblicher Weise weniger Fahrten vorsieht. Der maximale Wasserstoffmassenstrom bei der Betankung wird Messdaten des CHIC-Projekts entnommen und zu 2,8 kg/min festgelegt [34]. Für die Handling Time werden 10 min angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Einsatz von FCEB am ehesten lohnt, wenn die Fahrzeuge möglichst stark ausgelastet sind und dass batterieelektrische Fahrzeuge für hohe Tagesfahrleistungen weniger geeignet sind als für geringere. Demnach sollte in der Flotte als erstes der Bus durch einen FCEB ersetzt werden, der täglich die längste Strecke zurücklegt. Diese Argumentation ist angelehnt an einen Beitrag von Joffe et al. (2004) [65], in dem eine hohe Auslastung von FCEB als ein strategisches Ziel bei der Auswahl zu ersetzender Busse genannt wird.

Im dritten Schritt werden deshalb die zugrundeliegenden Busdaten absteigend nach Tagesfahrleistung sortiert. Dann wird für den ersten Bus dieser Liste (also mit der höchsten Tagesfahrleistung) eine Zeitreihe nach folgend beschriebener Methode erstellt. Für jeden Tag des Jahres werden der Zeitpunkt und die Dauer des Tankvorgangs stochastisch auf Basis der zuvor ermittelten Wahrscheinlichkeitsverteilung bestimmt. Damit soll widerspiegelt werden, dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass Tankvorgänge an jedem Tag zu genau der gleichen Uhrzeit stattfinden. Ergebnis dieser Methode ist eine Zeitreihe für das Tankverhalten eines Busses. Diese Zeitreihe dient als Eingangsgröße für die Erstellung einer Zeitreihe für eine Busflotte bestehend aus zwei Fahrzeugen. Der Zeitreihe wird also das Tankverhalten des zweiten Busses der Liste überlagert. Die stochastisch zugeordneten Tankvorgänge des zweiten Busses dürfen sich dabei nicht mit denen des ersten Busses überschneiden. Zusätzlich muss die Handling Time berücksichtigt werden. Das Ergebnis wiederum wird als Eingangsgröße für die nächst größere Busflotte aus drei Fahrzeugen verwendet und so fort. Die größte betrachtete Busflotte umfasst zehn Fahrzeuge. Sollte es nicht möglich sein, Tankvorgänge zeitlich anzuordnen ohne einen Tankvorgang (oder die Handling Time) eines anderen Busses zu überschneiden, so wird eine weitere Zapfsäule dem System hinzugefügt und der Prozess wiederholt. Die zuvor erstellten Tankzeitreihen, die als Eingangsgröße des dann aktuellen Vorgangs dienen, bleiben unverändert. Dies führt dazu, dass die bestehenden Zapfsäulen stark ausgelastet sind — so stark, dass kein weiterer Bus mehr integriert werden kann — und die neu hinzugefügte Zapfsäule nur gering ausgelastet ist, da sie nur von einem Bus genutzt wird. Einige Busse an den stark ausgelasteten Zapfsäulen könnten somit teilweise wahrscheinlich erst kurz vor der Abfahrt betankt werden. In der Realität würden die Busse gleichmäßiger auf die verfügbaren Zapfsäulen verteilt werden. Dies könnte man in der Modellierung abbilden, indem auch die zuvor berechneten Zeitreihen unter der Annahme der zusätzlichen Zapfsäule neu erstellt würden. Darauf wird hier allerdings verzichtet und der entstehende Fehler wird in Kauf genommen, um eine Ähnlichkeit der Zeitreihen unterschiedlicher Flottengrößen zu erreichen. So wird die Vergleichbarkeit der späteren Simulationsergebnisse zwischen verschiedenen Flottengrößen erhöht. Unterschiede in den Ergebnissen lassen sich auf diese Weise leichter auf die unterschiedlich große Wasserstoffnachfrage zurückführen und werden nicht

#### 4. Nicht-lokale und lokale Nachfrager von Wasserstoff als Kraftstoff

durch die Fahrzeugdisposition, die hier nicht untersucht werden soll, bedingt.

Ergebnis dieser Methode sind Tankzeitreihen für Flottengrößen zwischen einem und zehn Bussen sowie die für die jeweilige Flottengröße nötige Anzahl an Zapfsäulen. Die Zeitreihen werden für die weitere Verwendung mit der Schrittweite von einer Stunde ausgegeben. Der Tanklastgang von 5 Bussen ist für eine Beispielwoche in Abbildung 4.5 dargestellt.

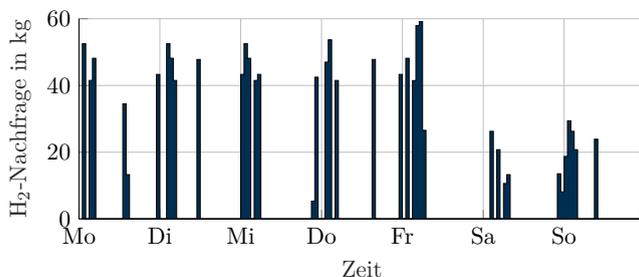


Abbildung 4.5.: Wasserstoffnachfrage in einer Beispielwoche für eine Flotte von 5 Bussen

#### 4.2.4. Kosten von Brennstoffzellenbussen

Eine Studie aus dem Jahr 2017 [127] vergleicht die Kosten eines FCEB mit denen eines Diesel- und eines BEV-Busses. Annahme ist, dass auch der Elektrobus über große Reichweite verfügen muss. Der Vergleich umfasst die Capex und die fixen Betriebskosten ( $Opex_{fix}$ ) der Busse (unter anderem Fahrzeugwartung, Wartung des Depots und der Infrastruktur, Gehalt des Fahrers) sowie die Errichtung von Ladeinfrastruktur für BEV-Busse. Tabelle 4.2 stellt die Ergebnisse zusammengefasst dar und leitet unter Annahme eines Zinssatzes von 3% sowie einer Lebensdauer der Busse von 12 Jahren [128] jährliche Kosten ab. Die jährlichen Mehrkosten von FCEB gegenüber BEV beziehungsweise Dieselbussen betragen etwa 23 000 € beziehungsweise 79 000 €. Die Studie prognostiziert, dass sich die Capex von FCEB bis zum Jahr 2030 etwa halbieren und dann den Capex von BEV-Bussen entsprechen, während sich die Capex von Dieselbussen nicht verändern. Kraftstoffkosten und die Kosten einer etwaigen Wasserstofftankstelle für die Busse sind hier nicht eingeschlossen. Die Tabelle zeigt dennoch vergleichend Energie- [129], Wasserstoff- [34] und Dieselverbräuche [130] sowie die Energie- [131] und Kraftstoffpreise, die einer ADAC-Statistik entnommen wurden [132].

Tabelle 4.2.: Kostenvergleich und Verbrauchskennzahlen für Brennstoffzellenbusse (FCEB), batterieelektrische Busse (BEV) und Dieselbusse [34], [127], [129]–[132]

	FCEB	BEV-Bus	Dieselbus
Capex Bus in €	666 000	562 648	170 894
Annuität Bus in $\frac{€}{a}$	66 908	56 525	17 168
Capex Ladeinfrastruktur in €	0	51 765	0
Annuität Ladeinfrastruktur in $\frac{€}{a}$	0	5200	0
Opex <sub>fix</sub> in $\frac{€}{a}$	108 235	90 588	78 824
Summe der jährlichen Kosten in $\frac{€}{a}$	175 143	152 313	95 992
Kraftstoffverbrauch in $\frac{l}{100 km}$			54,5
Kraftstoffverbrauch in $\frac{kg}{100 km}$	12,1		
Energieverbrauch in $\frac{kWh}{100 km}$		270	
Kraftstoffkosten in $\frac{€}{l}$			1,15
Energiekosten in $\frac{€ct.}{kWh}$		29,23	11,60

### 4.3. Taxis als lokale Nachfrager

In diesem Kapitel wird erläutert, inwiefern Taxis als lokale Nachfrager verstanden werden können und wie hoch das Potential für den Einsatz von mit Wasserstoff betriebenen Taxis im Betrachtungsgebiet ist. Anschließend werden die Anforderungen an Infrastruktur beschrieben und eine Methodik zur Modellierung der Wasserstoffnachfrage durch Taxis dargestellt.

#### 4.3.1. Beschreibung

Das Einsatzgebiet von Taxifloten ist im Wesentlichen auf die jeweilige Stadt begrenzt. Einzelne Fahrten können über dieses Kerngebiet hinaus führen, grundsätzlich kehren die Fahrzeuge jedoch wieder in ihr Einsatzgebiet zurück. Auch wenn Taxis im Gegensatz zu zum Beispiel Bussen keinen festen Fahrplan haben, so können sie dennoch als planbare und lokale Nachfrager im oben genannten Sinne angesehen werden. Taxis erzeugen nämlich täglich einen Kraftstoffbedarf, der örtlich begrenzt ist. Taxibetriebe unterscheiden sich in der Unternehmensstruktur und Fahrzeugnutzung.

#### 4. Nicht-lokale und lokale Nachfrager von Wasserstoff als Kraftstoff

Grundlegend lassen sich Alleinfahrer und Betriebe mit angestellten Mitarbeitern unterscheiden. Der Anteil der Alleinfahrer liegt beispielsweise in Köln bei etwa 24 %, in München bei etwa 55 % und in Berlin bei etwa 35 % (als professionell eingestufte Betriebe) beziehungsweise bei etwa 68 % (als semiprofessionell eingestufte Betriebe) [67]. Alleinfahrer betreiben ihr Fahrzeug im Ein-Schicht-Betrieb, also für mindestens acht Stunden am Tag. Die übrigen Betriebe können ihre Fahrzeuge höher auslasten, indem sie sie im Zwei- oder Drei-Schicht-Betrieb einsetzen. Während Fahrzeuge im Ein-Schicht-Betrieb durch längere Stand- und somit Ladezeiten von bis zu 16 Stunden eventuell auch durch BEV ersetzt werden können, wird dies bei Fahrzeugen im Zwei- oder gar Drei-Schicht-Betrieb häufig nicht möglich sein. Hier können FCEV eingesetzt werden. Informationen zu Unternehmenstypen oder Schichtsystem liegen jedoch nur für wenige Städte vor und werden deshalb in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Stattdessen wird von gemittelten Werten für tägliche Fahrstrecken ausgegangen (in Berlin beträgt die mittlere Tagesfahrstrecke etwa 160 km [67]). Um der Inhomogenität des Taxigewerbes Rechnung zu tragen, wird jeweils nur ein Teil der Fahrzeuge einer Stadt als für eine Umstellung geeignet angesehen. Taxis nutzen entweder Dieselmotoren (typischerweise Limousinen wie Mercedes E-Klasse oder Großraumtaxi wie VW Touran), Benzin (Hybridfahrzeuge wie Toyota Prius) oder Erdgas (zum Beispiel Opel Zafira). Grundsätzlich lassen sich alle gegenwärtig verfügbaren FCEV als Taxi einsetzen.

#### 4.3.2. Anforderungen an Infrastruktur

Taxis tanken grundsätzlich an öffentlichen Tankstellen, in mindestens einer Stadt dürfen sie jedoch auch an der Tankstelle des Bus-Betriebshofs tanken. Es ist unklar, wie viele Tankstellen in einer Stadt erforderlich sind, um einen Taxibetrieb mit FCEV zu ermöglichen. In dieser Arbeit wird die Annahme getroffen, dass von 50 % der Taxistände eine Wasserstofftankstelle innerhalb von 10 Minuten (bei einer angenommenen Durchschnittsgeschwindigkeit von 17 km/h und Luftlinienentfernung [126]) erreicht werden können muss. Dies entspricht einem Radius von 2833 m.

Taxis unterscheiden sich technisch nicht von anderen PKW und erfordern deshalb dieselben Tankstellenkomponenten. Dazu zählt in Abgrenzung zur Bus-Infrastruktur eine 700 bar-Betankung mit Vorkühlung.

#### 4.3.3. Modellierung des Tankverhaltens

Für diese Arbeit kann auf Daten zum Tankverhalten von Taxis zurückgegriffen werden (siehe Kapitel 3.2.2). Mit Hilfe dieser Daten zu Berliner und Hamburger Taxibetrieben wird das Tankverhalten modelliert. Zusätzlich werden Informationen zur Tourenverteilung von Taxis verwendet, die dasselbe Unternehmen bereitstellte [133].

Zunächst wird für jede Stunde einer Woche eine Wahrscheinlichkeit für einen Tankvorgang bestimmt. Dazu wird auf Daten zur zeitlichen Tourenverteilungen in Hamburg in zweistündiger Auflösung zurückgegriffen [133]. Die Daten beziehen sich auf das Jahr 2013 und umfassen 242 638 Fahrten. Es wird angenommen, dass die Häufigkeiten der Tankvorgänge mit den Fahrhäufigkeiten korrelieren. Diese Annahme kann zwar hinterfragt werden, da durchschnittlich weniger als ein Tankvorgang pro Tag ausreichend ist und Taxis vermutlich vorzugsweise dann tanken, wenn die Auslastung gering ist. Auf der anderen Seite dauern Tankvorgänge nur wenige Minuten, sodass sie keine wesentliche Einschränkung für den Taxibetrieb darstellen. Da Taxis zudem grundsätzlich dann betankt werden, wenn sie auch eingesetzt werden, wird die erwähnte Annahme getroffen. Unter dieser Annahme lassen sich die relativen Tankhäufigkeiten in zweistündiger Auflösung direkt aus den Daten ableiten. Um eine stündliche Auflösung zu erhalten, wird davon ausgegangen, dass die Wahrscheinlichkeiten in den je zwei Stunden konstant sind (siehe Abbildung 4.6).

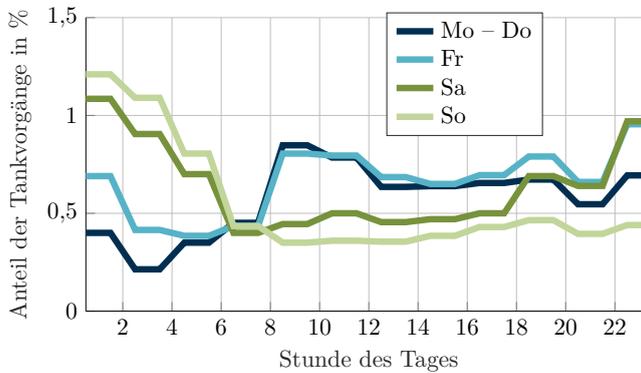


Abbildung 4.6.: Stündliche Tankwahrscheinlichkeit für Taxis (Mittelwert für Mo – Do)

Diese Tankwahrscheinlichkeiten werden später verwendet, um Tanklastgänge für verschiedene Flottengrößen (zwischen 10 und 100 Fahrzeuge) zu erzeugen. Dazu werden zunächst folgende Annahmen getroffen: Der Kraftstoffverbrauch beträgt  $1 \text{ kg}/100 \text{ km}$ , jährlich legt jedes Taxi  $58\,459 \text{ km}$  zurück [67] und je Tankvorgang werden im Mittel  $4,5 \text{ kg}$ , mindestens  $2 \text{ kg}$  und höchstens  $7 \text{ kg}$  Wasserstoff innerhalb von je 3 Minuten getankt. Der angenommene Kraftstoffverbrauch ist im Vergleich zu Herstellerangaben ( $0,76 \frac{\text{kg}}{100 \text{ km}}$ ) [5] hoch gewählt, da das Fahrprofil von Taxis vom Testzyklus abweicht, der den Herstellerangaben zugrunde liegt. Da keine Informationen zu saisonal unterschiedlichem Fahr- oder Tankverhalten vorliegen, werden saisonale Effekte nicht berücksichtigt. Aus dem Kraftstoffverbrauch und der jährlich zurückgelegten Strecke wird für jede betrachtete Flottengröße ein mittlerer täglicher Kraftstoffbedarf bestimmt. Zusammen mit der durchschnittlich pro Tankvorgang abgegebenen Was-

#### 4. Nicht-lokale und lokale Nachfrager von Wasserstoff als Kraftstoff

serstoffmasse von 4,5 kg kann eine durchschnittliche Anzahl an Tankvorgängen bestimmt werden. Diese beiden Größen (durchschnittlicher täglicher Kraftstoffbedarf und durchschnittliche Anzahl an Tankvorgängen) werden dann mit den jeweils maximal zulässigen Werten gemäß den Tankstellenklassen „Very small“, „Small“, „Medium“ und „Large“ verglichen. Jeder Flottengröße kann so eine Tankstellenklasse zugeordnet werden. Tabelle 4.3 zeigt für ausgewählte Flottengrößen den Kraftstoffbedarf, die Anzahl der Tankvorgänge, die gewählte Tankstellenklasse sowie die jeweiligen maximal zulässigen Werte für diese Klasse. Gemäß der jeweils bestimmten Klasse werden die maximale Anzahl an Tankvorgängen pro Stunde und pro Tag sowie die maximal zu vertankende Masse Wasserstoff pro Stunde und pro Tag festgelegt. Außerdem wird die Anzahl der Zapfsäulen der jeweiligen Klasse entnommen (siehe Tabelle 4.1). Für alle Klassen werden die zugelassene Anzahl an Back-to-back-Betankungen sowie die minimale Wartezeit zwischen zwei Tankvorgängen mindestens auf die Werte der Klasse „Small“ gesetzt (5 Minuten Wartezeit, je eine Back-to-back-Betankung erlaubt), da die Parameter der Klasse „Very small“ für die Versorgung von Taxis als zu restriktiv (keine Back-to-back-Betankungen erlaubt sowie 20 Minuten Wartezeit zwischen zwei Betankungen) bewertet werden. Die Handling Time beträgt 3 Minuten.

Tabelle 4.3.: Eigenschaften verschiedener Taxi-Flottengrößen

	Flottengröße			
	10	20	50	100
Durchschnittlicher Kraftstoffbedarf (max. gemäß Tankstellenklasse) in kg/d	16 (56)	32 (56)	80 (168)	160 (336)
Durchschnittliche Anzahl Tankvorgänge pro Tag (max. gemäß Tankstellenklasse)	3,6 (10)	7,1 (10)	18 (30)	36 (60)
Tankstellenklasse	Very small	Very small	Small	Medium

Für jede gewählte Flottengröße wird dann mit Hilfe dieser Annahmen und der zuvor bestimmten Tankwahrscheinlichkeiten ein Tanklastgang erzeugt. Dazu werden Tankvorgänge stochastisch auf die Minuten eines Jahres verteilt, sodass sie — sofern möglich — die Tankwahrscheinlichkeiten abbilden. Durch die stochastische Verteilung wird erreicht, dass im Tanklastgang keine sich identisch wiederholenden Muster entstehen, sondern jeder Tag und jede Woche individuell ausgeprägt sind. Gleichwohl bleiben Charakteristika, wie beispielsweise Nachfragespitzen zu bestimmten Uhrzeiten, erhalten. Es wird sichergestellt, dass die Randbedingungen (zum Beispiel maximale vertankte Masse Wasserstoff pro Stunde) nicht verletzt werden und Tankvorgänge nicht kollidieren oder die Wartezeit beziehungsweise Handling Time verletzen. Abschließend werden die entstandenen Tanklastgänge in Stundenauflösung ausge-

geben. Abbildung 4.7 zeigt den Lastgang einer Flotte von 50 Fahrzeugen in einer Beispielwoche.

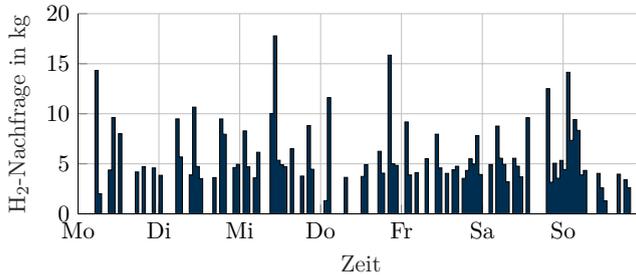


Abbildung 4.7.: Wasserstoffnachfrage in einer Beispielwoche für eine Flotte von 50 Taxis

#### 4.3.4. Kosten von Brennstoffzellentaxis

Gegenwärtig werden nur wenige FCEV-Modelle angeboten. Der Toyota Mirai ist eines davon und lässt sich als Taxi betreiben. Am Beispiel dieses Fahrzeugs erfolgt nun ein Kostenvergleich mit Dieselfahrzeugen und BEV. Grundlage für den Vergleich sind Leasingraten für einen Fahrzeugbetrieb mit maximal 20 000 km pro Jahr. Dies entspricht zwar nicht der Jahresfahrleistung eines Taxis, aber da für den Toyota Mirai gegenwärtig keine Kosteninformationen zu höheren Fahrleistungen vorliegen, wird dies als Vergleichsgrundlage gewählt. Die Leasingraten enthalten darüber hinaus die Kosten für Versicherung, Wartung und Winterräder. Tabelle 4.4 zeigt die Leasingraten und die entstehenden jährlichen Kosten. Die jährlichen Mehrkosten für FCEV betragen etwa 3800 € (BEV) beziehungsweise etwa 8000 € (Diesel). Die unterschiedlichen Kraftstoffkosten und -verbräuche sind dargestellt, aber nicht berücksichtigt. Die Daten der Kraftstoff- und Energieverbräuche entstammen einem Taxi-Magazin [134], [135], lediglich der Wasserstoffverbrauch basiert auf eigener Annahme. Die Energiekosten entstammen der Strompreisanalyse des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. [131] sowie im Falle von Diesel einem Mittelwert von Oktober 2016 bis September 2017 einer ADAC-Statistik [132]. Wasserstoffkosten werden im Verlaufe dieser Arbeit für verschiedene Szenarien bestimmt und nicht pauschal angenommen.

#### 4. Nicht-lokale und lokale Nachfrager von Wasserstoff als Kraftstoff

Tabelle 4.4.: Kostenvergleich und Verbrauchskennzahlen für Brennstoffzellen-PKW (FCEV), batterieelektrische PKW (BEV) und Diesel-PKW [132], [134]–[138]

	FCEV	BEV	Diesel-PKW
Hersteller	Toyota	Tesla	Mercedes-Benz
Modell	Mirai	Model S	E-Klasse 220d
Leasingrate in $\frac{\text{€}}{\text{Monat}}$	1219	905	554
Leasingkosten in $\frac{\text{€}}{\text{a}}$	14 628	10 860	6648
Kraftstoffverbrauch in $\frac{\text{l}}{100 \text{ km}}$			10,24
Kraftstoffverbrauch in $\frac{\text{kg}}{100 \text{ km}}$	1		
Energieverbrauch in $\frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}}$		20	
Kraftstoffkosten in $\frac{\text{€}}{\text{l}}$			1,15
Energiekosten in $\frac{\text{€ct.}}{\text{kWh}}$		29,23	11,60

### 4.4. Carsharing-Fahrzeuge als lokale Nachfrager

In diesem Kapitel werden Carsharing-Fahrzeuge als lokale Nachfrager beschrieben (siehe Kapitel 4.4.1). Neben dem Infrastrukturbedarf (siehe Kapitel 4.4.2) wird eine Methodik zur Modellierung der Wasserstoffnachfrage durch Carsharing-Fahrzeuge vorgestellt (siehe Kapitel 4.4.3).

#### 4.4.1. Beschreibung

Carsharing ist ein Mobilitätskonzept, bei dem mehrere Nutzer sich ein oder mehrere Fahrzeuge teilen, sie also gemeinsam (sequentiell) nutzen. Idealerweise ersetzt jedes Carsharing-Fahrzeug mindestens einen privaten PKW, sodass die Auslastung erhöht werden kann. In diesem Fall lassen sich die Kosten sowie die erforderliche Park- und Verkehrsfläche verringern. Es können verschiedene Carsharing-Konzepte unterschieden werden: privates Carsharing, stationsgebundenes Carsharing und Free-floating-Carsharing.

Bei privatem Carsharing organisieren die Nutzer Wartung, Bezahlung, Nutzung und dergleichen selbst. Bei stationsgebundenem und Free-floating-Carsharing übernimmt ein Unternehmen diese Organisation. Typischerweise müssen Nutzer sich registrieren und können dann Fahrzeuge online im Voraus oder spontan buchen. Sie zahlen entweder für jeden zurückgelegten Kilometer oder die Dauer der Fahrzeugnutzung oder für

eine Kombination aus Strecke und Zeit. Anschaffungs-, Wartungs-, Kraftstoff- und Versicherungskosten werden vom Anbieter getragen und über die Nutzungsgebühren finanziert. Bei stationsgebundenem Carsharing können die Fahrzeuge an definierten Orten innerhalb einer Stadt ausgeliehen werden und müssen am Ende der Buchung auch dort wieder abgestellt werden. Ein derartiger Anbieter ist beispielsweise Flinkster. Zum 01.01.2017 waren etwa 455 000 Fahrberechtigte und 9400 Fahrzeuge in 597 Städten gemeldet [139]. Ein weiterer relevanter Anbieter ist teilAuto, der in 17 Städten 850 Fahrzeuge anbietet. Es besteht eine Kooperation mit Flinkster, sodass auch diese Fahrzeuge über das System von teilAuto gebucht werden können [140].

Free-floating-Carsharing hingegen verzichtet auf Stationen, sondern weist ein Nutzungsgebiet innerhalb einer Stadt aus. In diesem Gebiet können Fahrzeuge an öffentlichen Parkplätzen ausgeliehen und nach Buchungsende wieder geparkt werden. Das Gebiet muss nicht zusammenhängend sein. Bekannte Anbieter von Free-floating-Carsharing sind car2go und DriveNow. Zum 01.01.2017 waren etwa 1,26 Mio. Fahrberechtigte und 7800 Fahrzeuge in 12 deutschen Städten für diese Art von Carsharing gemeldet [139].

Es gibt auch Anbieter, die eine Kombination der beiden Modelle einsetzen. Das Münchner Unternehmen BeeZero beispielsweise weist keine Stationen, sondern Zonen aus [141]. Die dort entliehenen Fahrzeuge müssen auch wieder in die jeweilige Zone zurückgebracht werden. Innerhalb einer Zone können die Fahrzeuge jedoch beliebig abgegeben werden. BeeZero setzt zudem bereits ausschließlich FCEV (Hyundai ix35 Fuel Cell) ein. Grundsätzlich eignen sich alle PKW-Modelle als Carsharing-Fahrzeuge. Bislang werden beispielsweise von car2go unter anderem smart fortwo, von DriveNow unter anderem BMW 1er und von Flinkster unter anderem Ford Fiesta eingesetzt. In dieser Arbeit wird nicht zwischen unterschiedlichen Arten von Carsharing unterschieden.

#### 4.4.2. Anforderungen an Infrastruktur

Carsharing-Fahrzeuge werden an konventionellen Tankstellen getankt. Es liegen keine Informationen darüber vor, wie viele Tankstellen in einer Stadt erforderlich sind, um einen Carsharing-Betrieb zu ermöglichen. In dieser Arbeit wird deshalb die Annahme getroffen, dass 50 % der Stadtbevölkerung eine Wasserstofftankstelle innerhalb von 10 Minuten (bei einer angenommenen Luftliniengeschwindigkeit von  $17 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  [126]) erreichen können muss. Dies entspricht einem Radius von 2833 m.

Carsharing-Fahrzeuge sind PKW und erfordern deshalb dieselben Tankstellenkomponenten. Dazu zählt in Abgrenzung zur Bus-Infrastruktur eine 700 bar-Betankung mit Vorkühlung.

### 4.4.3. Modellierung des Tankverhaltens

Die Literaturanalyse ergab keine für diese Arbeit verwendbaren Modelle zum Tankverhalten von Carsharing-Fahrzeugen (siehe Kapitel 3.2.3). Deshalb wird eine neue Methodik zur Modellierung des Tankprofils von Carsharing-Fahrzeugen entwickelt und angewendet. Sie wurde bereits veröffentlicht [142] und wird im Folgenden dargestellt. Zur Modellierung werden unter anderem Daten verwendet, die von civity erhoben wurden (siehe Kapitel 3.2.3). Diese umfassen Informationen zu Tankzeitpunkten von DriveNow und car2go-Fahrzeugen in sechs deutschen Städten sowie die jeweiligen Flottengrößen [71]. Darüber hinaus bestehen nicht-aggregierte Daten von car2go-Fahrzeugen zu Tankfüllständen zu Beginn und am Ende einer Fahrt [72].

Für die Modellierung wird die mittlere Jahresfahrleistung von Carsharing-Fahrzeugen benötigt. Zunächst wird dazu die Fahrzeugreichweite abgeschätzt. Da Informationen zur Flottenzusammensetzung nicht vorliegen, wird angenommen, dass die car2go-Flotte ausschließlich aus Smart fortwo besteht und die DriveNow Flotte zu je gleichen Teilen BMW 1er (Benzin), BMW 1er (Diesel), Mini (Benzin) und Mini (Diesel) umfasst und car2go und DriveNow je die Hälfte der Gesamtflotte stellen. Für diese Fahrzeuge werden Tankvolumina gemäß Herstellerangaben<sup>1</sup> [143]–[145] und Kraftstoffverbräuche gemäß Daten des Verbraucherportals [spritmonitor.de](http://spritmonitor.de) herangezogen (nur Fahrzeuge ab Baujahr 2016, keine Einschränkung der Motorisierung) [146]. Aus diesen Informationen werden Reichweiten der Fahrzeuge mit einer Tankfüllung bestimmt. Aus den von civity bereitgestellten Daten zu Tankfüllständen [72] wird der mittlere Tankfüllstand zu Beginn von Fahrten bestimmt, die einen Tankvorgang beinhalten. Dieser Wert beträgt 43%. Es wird angenommen, dass dies der Tankfüllstand zu Beginn des Tankvorgangs ist. Dann wird auf Basis dieses Wertes und der jeweiligen Reichweite ermittelt, welche Strecke die Fahrzeuge im Mittel zwischen zwei Tankvorgängen zurücklegen (genutzte Reichweite). Aus den von civity zur Verfügung gestellten Daten zu Tankhäufigkeiten kann die Information gewonnen werden, dass 60 Tankvorgänge durchschnittlich pro Jahr und Fahrzeug stattfinden [71]. Zusammen mit der genutzten Reichweite und den Anteilen der Fahrzeugmodelle an der Gesamtflotte wird eine mittlere Jahresfahrleistung der Carsharing-Fahrzeuge von 19 272 km bestimmt (siehe Tabelle 4.5). Dies entspricht weniger als der Hälfte der Jahresfahrleistung von Taxis in Berlin.

Ergänzend zur mittleren Jahresfahrleistung sind zeitlich aufgelöste Tankwahrscheinlichkeiten erforderlich, um das Tankverhalten zu modellieren. Ziel ist es, für jede Stunde der Woche eine relative Tankhäufigkeit zu bestimmen. Dazu werden die von civity bereitgestellten Daten zur zeitlichen Verteilung von Tankvorgängen [71] sowie zur monatlichen Flottengröße verwendet. Erstere enthalten für die Stunden des Erhebungszeitraums die Anzahl der Tankvorgänge in der jeweiligen Stunde. Für jeden Datensatz wird nun bestimmt, auf welche Wochenstunde (zum Beispiel 13 bis 14 Uhr

<sup>1</sup>Für Mini Cooper S wird das Tankvolumen der übrigen Benzin-Modelle angenommen (40 l statt 44 l).

Tabelle 4.5.: Abschätzung der Jahresfahrleistung von Carsharing-Fahrzeugen [71], [72], [143]–[146]

	Smart	BMW 1er		Mini	
	fortwo	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel
Tankvolumen in $l$	28	52	52	40	44
Verbrauch in $\frac{l}{100km}$	6,30	8,65	5,99	7,90	5,83
Reichweite in km	444	601	868	506	755
Genutzte Reichweite in km	253	343	495	289	430
Anteil an Flotte in %	50	12,5	12,5	12,5	12,5
Anzahl Tankvorgänge p.a.		60			
Mittlere Fahrleistung in $\frac{km}{a}$		19 272			

am Dienstag) er sich bezieht und wie groß die Flotte in dem entsprechenden Monat war. Die Anzahl der Tankvorgänge des jeweiligen Datensatzes wird dann durch die Flottengröße geteilt, sodass sich eine Anzahl Tankvorgänge pro Fahrzeug in der jeweiligen Wochenstunde ergibt. Dieser Wert wird für alle Datensätze der gleichen Wochenstunde summiert. Da nicht für jede Wochenstunde die gleiche Anzahl an Datensätzen vorliegt, werden die gebildeten Summen je Wochenstunde entsprechend korrigiert, indem sie durch die Anzahl der jeweils verfügbaren Datensätze geteilt werden. Daraus lassen sich direkt relative Tankhäufigkeiten ableiten (siehe Abbildung 4.8) sowie die maximale Anzahl an Tankvorgängen je Stunde und Fahrzeug bestimmen. Demnach führt jedes Fahrzeug zu 0,0160 Tankvorgängen je Stunde.

Zusätzlich werden die Tankvorgänge tageweise ausgewertet. Aus dem Datensatz werden die Stunden des Zeitraums entfernt, für die keine Daten vorliegen (161 Stunden). Liegen für einzelne Tage unvollständige Daten vor, so werden die entsprechenden Einträge entweder aus dem Datensatz entfernt (wenn für weniger als 16 Stunden des jeweiligen Tages Daten vorhanden sind) oder korrigiert (Skalierung auf 24 Stunden). Danach enthält der Datensatz noch Einträge für 199 Tage.

Dann werden für jeden Tag die Tankvorgänge gezählt und durch die jeweilige Flottengröße geteilt. Daraus lassen sich die durchschnittliche Anzahl der Tankvorgänge pro Tag und Fahrzeug (0,165) sowie die maximal auftretende Anzahl an Tankvorgängen pro Tag und Fahrzeug (0,204) ermitteln.

Mit diesen Informationen lässt sich nun jeder Flottengröße eine Wasserstofftankstellenklasse zuordnen. Dabei müssen die durchschnittliche Anzahl der Tankvorgänge pro Tag, die maximale Anzahl der Tankvorgänge pro Tag sowie die maximale Anzahl

#### 4. Nicht-lokale und lokale Nachfrager von Wasserstoff als Kraftstoff

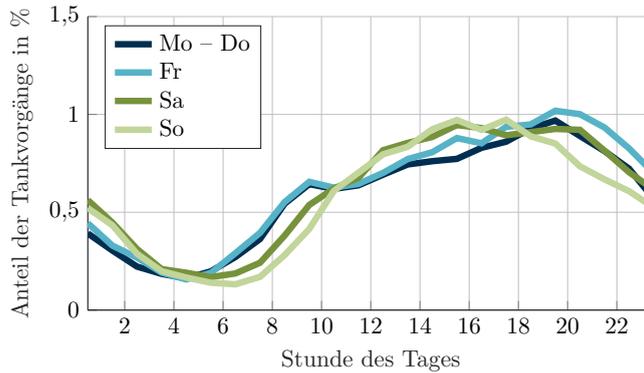


Abbildung 4.8.: Stündliche Tankwahrscheinlichkeit für Carsharing-Fahrzeuge (Mittelwert für Mo – Do)

der Tankvorgänge pro Stunde unter dem jeweiligen Kennwert der Klasse liegen. Das Ergebnis zeigt, dass für eine Flottengröße bis einschließlich 60 Fahrzeuge die Klasse „Very small“ genügt, während für Flotten bis einschließlich 181 Fahrzeuge beziehungsweise bis 363 Fahrzeuge die Klassen „Small“ beziehungsweise „Medium“ geeignet sind. Die Klasse „Large“ kann mindestens 500 Fahrzeuge versorgen.

Für die Erstellung der Tankzeitreihen werden folgende Annahmen getroffen. Die Anzahl der Zapfsäulen sowie die maximale abzugebende Masse pro Stunde ( $m_{h, \max}$ ) wird aus der jeweils gültigen Tankstellenklasse übernommen. Der Kraftstoffverbrauch je Fahrzeug beträgt  $1 \text{ kg}/100 \text{ km}$  und die Jahresfahrleistung (wie zuvor bestimmt)  $19\,272 \text{ km}$ . Der angenommene Kraftstoffverbrauch übersteigt die Herstellerangabe [5], da auch hinsichtlich der konventionellen Fahrzeuge von realen, erhöhten Verbräuchen ausgegangen wird. Aus den genannten Daten lässt sich ein Kraftstoffbedarf je Fahrzeug und Tag  $m_{d, \text{Fzg}}$  von  $0,528 \text{ kg}$  ableiten. Für die durchschnittlich von der Tankstelle abgegebene Masse pro Tag  $m_{d, \text{avg}}$  gilt  $m_{d, \text{avg}} = n_{\text{Fzg}} \cdot m_{d, \text{Fzg}}$ , mit der Flottengröße  $n_{\text{Fzg}}$ . Die höchstens zulässige Anzahl an Tankvorgängen pro Stunde  $n_{h, \max}$  entspricht dem Maximum aus allen stundenweise gezählten Tankvorgängen je Fahrzeug multipliziert mit  $n_{\text{Fzg}}$ . Es wird angenommen, dass die durchschnittliche Anzahl an Tankvorgängen pro Tag  $n_{d, \text{avg}}$  dem Produkt aus dem Mittelwert aus allen tageweise gezählten Tankvorgängen je Fahrzeug und  $n_{\text{Fzg}}$  entspricht. Entsprechend ergibt sich die maximale Anzahl an Tankvorgängen pro Tag  $n_{d, \max}$  aus dem Maximum aller tageweise gezählten Tankvorgänge multipliziert mit  $n_{\text{Fzg}}$ . Die an einem Tag höchstens abzugebende Masse  $m_{d, \max}$  ergibt sich aus  $m_{d, \max} = m_{d, \text{avg}} \cdot \frac{n_{d, \max}}{n_{d, \text{avg}}}$ . Für die durchschnittlich bei einem Tankvorgang abgegebene Masse  $m_{\text{avg}}$  gilt  $m_{\text{avg}} = \frac{m_{d, \text{avg}}}{n_{d, \text{avg}}}$ . Die bei einem Tankvorgang mindestens abgegebene Masse  $m_{\min}$  beträgt  $2 \text{ kg}$  und es gilt für die maximal abgegebene Masse  $m_{\max} = \min(7 \text{ kg}, 2m_{\text{avg}} - m_{\min})$ .

Entsprechend dem Vorgehen bei der Erzeugung von Tanklastgängen für Taxis werden die zugelassene Anzahl an Back-to-back-Betankungen sowie die minimale Wartezeit zwischen zwei Tankvorgängen für alle Klassen mindestens auf die Werte der Klasse „Small“ gesetzt (5 Minuten Wartezeit, je eine Back-to-back-Betankung erlaubt). Die Handling Time beträgt 3 Minuten.

Für die Flottengrößen 10, 20, 50, 100 und 200 werden dann unter Nutzung der zuvor ermittelten Tankwahrscheinlichkeiten Tanklastgänge erzeugt. Dabei werden — wie zuvor bei der Erzeugung der Tanklastgänge für Taxis auch — die Tankvorgänge stochastisch auf die Minuten des Jahres verteilt. So wird gewährleistet, dass sich realistische Lastgänge ergeben, die keine sich wiederholenden Muster aufweisen. Bei der Verteilung der Tankvorgänge werden die zuvor bestimmten Randbedingungen ( $n_{h, \max}$ ,  $n_{d, \max}$ ,  $m_{\max}$ ,  $m_{\min}$ ,  $m_{d, \max}$  und  $m_{h, \max}$ ) eingehalten und es wird sichergestellt, dass die Tankvorgänge weder kollidieren noch die Wartezeit oder Handling Time verletzen. Die Tanklastgänge werden anschließend in Stundenaufösung ausgegeben. Abbildung 4.9 zeigt beispielhaft den Tanklastgang einer Woche für eine Flotte von 50 Fahrzeugen.

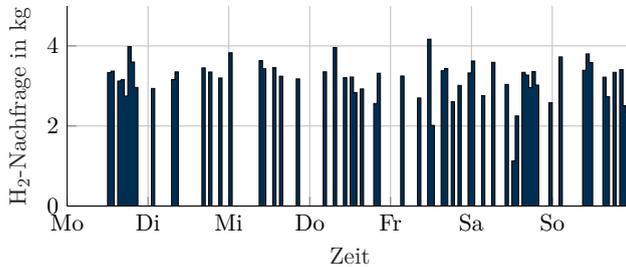


Abbildung 4.9.: Wasserstoffnachfrage in einer Beispielwoche für eine Flotte von 50 Carsharing-Fahrzeugen

#### 4.4.4. Kosten von Carsharing-Fahrzeugen mit Brennstoffzelle

Da die Auswahl an FCEV gering ist, wird auch für den Kostenvergleich von Carsharing-Fahrzeugen auf den Toyota Mirai zurückgegriffen. Zwar wird im BeeZero-Carsharing ein anderes Modell eingesetzt, für dieses liegen jedoch keine für den Vergleich tauglichen Kosteninformationen vor. Beide Fahrzeugtypen entsprechen nicht der im Carsharing üblichen Fahrzeugkategorie. Grundlage für den Vergleich sind Leasingraten für einen Fahrzeugbetrieb mit maximal 20 000 km pro Jahr. Dies entspricht in etwa der Jahresfahrleistung von Carsharing-Fahrzeugen. Die Leasingraten enthalten darüber hinaus die Kosten für Versicherung, Wartung und Winterräder. Tabelle 4.6 zeigt die Leasingraten und die entstehenden jährlichen Kosten. Die jährlichen Mehrkosten für FCEV betragen etwa 7500 € (BEV) beziehungsweise etwa 10 700 €

#### 4. Nicht-lokale und lokale Nachfrager von Wasserstoff als Kraftstoff

(Benzin). Gegenwärtig kann für die Beschaffung von FCEV und BEV mit einem Netto-Listenpreis von höchstens 60 000 € allerdings eine Förderung („Umweltbonus“ [147]) in Höhe von 4000 € in Anspruch genommen werden, die hier nicht berücksichtigt wird. Die unterschiedlichen Kraftstoffkosten und -verbräuche sind dargestellt, aber nicht berücksichtigt. Die Daten der Kraftstoff- und Energieverbräuche entstammen dem Verbraucherportal spritmonitor.de [146], lediglich der Wasserstoffverbrauch basiert auf eigener Annahme. Die Energiekosten entstammen der Strompreisanalyse des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. sowie im Falle der flüssigen Kraftstoffe einem Mittelwert von Oktober 2016 bis September 2017 einer ADAC-Statistik [132]. Wasserstoffkosten werden im Verlaufe dieser Arbeit für verschiedene Szenarien bestimmt und nicht pauschal angenommen.

Tabelle 4.6.: Kostenvergleich und Verbrauchskennzahlen für Brennstoffzellen-PKW (FCEV), batterieelektrische PKW (BEV), Diesel- und Benzin-PKW [131], [132], [136], [138], [146]

	FCEV	BEV	Diesel-PKW	Benzin-PKW
Hersteller	Toyota	Nissan	BMW	BMW
Modell	Mirai	Leaf	118d	118i
Leasingrate in $\frac{\text{€}}{\text{Monat}}$	1219	594	454	329
Leasingkosten in $\frac{\text{€}}{\text{a}}$	14 628	7128	5448	3948
Kraftstoffverbrauch in $\frac{\text{l}}{100 \text{ km}}$			5,90	7,96
Kraftstoffverbrauch in $\frac{\text{kg}}{100 \text{ km}}$	1			
Energieverbrauch in $\frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}}$		16,6		
Kraftstoffkosten in $\frac{\text{€}}{\text{l}}$			1,15	1,34
Energiekosten in $\frac{\text{€ct.}}{\text{kWh}}$		29,23	11,60	15,11

### 4.5. Zusammenfassung von Kapitel 4 und Literaturabgleich

Im Folgenden werden die wesentlichen Schritte und Ergebnisse dieses Kapitels zusammengefasst und ausgewählte Annahmen der Literatur gegenübergestellt.

#### Zusammenfassung

Um HRS passend zu den jeweiligen Nachfragern auszulegen, werden in Kapitel 5 Zeitreihen zur Wasserstoffnachfrage von privaten PKW und Flottenfahrzeugen benötigt. Deshalb wurde in diesem Kapitel ihr Tankverhalten modelliert. Flottenfahrzeuge

benötigen nur lokal begrenzte Infrastruktur und erzeugen eine garantierte, teilweise auch zeitlich planbare Kraftstoffnachfrage. Derartige Nachfrager werden in dieser Arbeit als lokale Nachfrager bezeichnet. Als solche werden Stadtbusse (1, 2, 5 und 10 Fahrzeuge je HRS), Taxis (10, 20, 50 und 100 Fahrzeuge je HRS) und Carsharing-Fahrzeuge (10, 20, 50, 100 und 200 Fahrzeuge je HRS) untersucht. Für jeden Nachfrager-Typ wurde eine Methodik zur Erzeugung eines synthetischen Nachfrageprofils (Tanklastgang) beschrieben und angewendet. Dabei wurde jeweils auf Daten zum tatsächlichen Tank- oder Fahrverhalten zurückgegriffen und ein stochastisches Verfahren gewählt, das für realistische Profile ohne sich wiederholende Muster sorgt. Die Profile wurden in stündlicher Auflösung für ein Jahr erzeugt. Zusätzlich wurde ein Nachfrageprofil für private PKW generiert, das sich an der Tankstellenklasse „Very small“ (siehe Tabelle 4.1) orientiert. Jeder Nachfrager-Typ erfordert unterschiedliche Flächenabdeckungen mit Tankinfrastruktur. Busse benötigen eine Tankstelle in unmittelbarer Nähe zum Depot. Die Anforderungen von Taxis und Carsharing-Fahrzeugen sind nicht bekannt, deshalb wurden folgende Annahmen zur geforderten Flächenabdeckung getroffen. Taxis müssen demnach von 50 % der Taxistände eine Wasserstofftankstelle innerhalb von 10 Minuten erreichen können. Zum Betrieb von Carsharing-Fahrzeugen muss für 50 % der Bevölkerung des Stadtgebiets sichergestellt sein, dass eine HRS innerhalb von 10 Minuten erreicht werden kann.

#### Literaturabgleich

In dieser Arbeit wird ein streckenbezogener Wasserstoffverbrauch von Carsharing-Fahrzeugen, Taxis und Bussen angenommen, um einen Nachfragerlastgang für die Auslegung von HRS zu bestimmen. Der Wasserstoffverbrauch von PKW wird mit  $1 \frac{\text{kg}}{100\text{km}}$  und der von Bussen mit  $12,1 \frac{\text{kg}}{100\text{km}}$  angenommen. Diese Werte werden nachfolgend mit Angaben der Literatur verglichen.

Ogden et al. (2011) [60] nehmen einen Wasserstoffverbrauch von  $1,04 \frac{\text{kg}}{100\text{km}}$  für PKW an. Die Studie GermanHy [50] sieht für den Zeitraum von 2010 bis 2050 eine lineare Abnahme des Verbrauchs von  $0,92 \frac{\text{kg}}{100\text{km}}$  auf  $0,58 \frac{\text{kg}}{100\text{km}}$  vor. Für das Jahr 2017 würde dies einem Verbrauch von  $0,86 \frac{\text{kg}}{100\text{km}}$  entsprechen. Robinius (2015) [52] übernimmt diese Werte, während von Robinius et al. (2018) [30] von einem Verbrauch in Höhe von  $0,65 \frac{\text{kg}}{100\text{km}}$  ausgegangen wird. Die in dieser Arbeit getroffene Annahme befindet sich somit im oberen Bereich dieses Spektrums. Sie ist daher konservativ hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugbetriebs und der Fahrzeugreichweite aber optimistisch im Hinblick auf die resultierende Tankstellenauslastung einzuschätzen.

Die getroffene Annahme zum Verbrauch von Bussen basiert auf den empirischen Werten des CHIC-Projekts [34]. Andere Quellen weisen einen Verbrauch von  $8,0 \frac{\text{kg}}{100\text{km}}$  [127],  $11,25 \frac{\text{kg}}{100\text{km}}$  [65] und  $15,5 \frac{\text{kg}}{100\text{km}}$  [148] aus. In [128] wird zwischen Standard- (12 m) und Gelenkbussen (18 m) unterschieden ( $8,6 \frac{\text{kg}}{100\text{km}}$  und  $13 \frac{\text{kg}}{100\text{km}}$ ). Da in dieser Arbeit davon ausgegangen wird, dass ausschließlich 18 m-Busse durch FCEB ersetzt werden, kann die getroffene Annahme als im mittleren Bereich der üblichen Werte angesehen werden.



## 5. Auslegung einer H<sub>2</sub>-Initialzelle

In der vorliegenden Arbeit werden lokale Wasserstoffsysteme betrachtet, die jeweils einen Elektrolyseur zur Wasserstoffproduktion, WEA zur Energieversorgung und eine HRS beinhalten. Diese Systeme werden in dieser Arbeit H<sub>2</sub>-Initialzellen genannt. Es wird davon ausgegangen, dass sich alle Komponenten in räumlicher Nähe zur HRS befinden, weshalb die Begriffe Wasserstofftankstelle und H<sub>2</sub>-Initialzelle im Folgenden synonym verwendet werden. Unabhängig vom Gesamtnetzwerk aus HRS eignen sich diese Systeme zur Versorgung von Fahrzeugen mit lokal begrenzter Wasserstoffnachfrage, wie Busse, Taxis und Carsharing-Fahrzeuge (siehe Kapitel 4). In dieser Arbeit wird untersucht, in welchem Maße der Aufbau eines HRS-Netzwerks für diese Flotten — basierend auf H<sub>2</sub>-Initialzellen — auch vorteilhaft für private PKW sein kann. Insbesondere soll geklärt werden, ob die Errichtung von Infrastruktur für Flotten und deren Umstellung auf FCEV eine sinnvolle Maßnahme in der gegenwärtigen Initialphase des Infrastrukturaufbaus ist. Dies hängt unter anderem von den Kosten der für Flotten zu errichtenden HRS ab. Um diese bestimmen zu können, wird in diesem Kapitel die optimale Tankstellenkonfiguration für jeden betrachteten Flottentyp und jede Flottengröße ermittelt. Dazu werden die in Kapitel 4 generierten Nachfrageprofile der jeweiligen Flottentypen verwendet. Für jede ermittelte Tankstellenkonfiguration wird die Wirtschaftlichkeit bestimmt. Diese Informationen fließen in die Auslegung eines Netzwerks aus HRS in Kapitel 6 ein (siehe Abbildung 5.1).

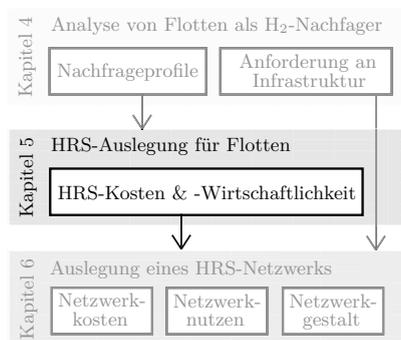


Abbildung 5.1.: Verknüpfung des Kapitels 5 mit den übrigen Kapiteln

In Kapitel 5.1 wird die angewendete Methodik erläutert. Die Ergebnisse hinsichtlich Tankstellenkonfiguration und Kosten werden in Kapitel 5.2 gezeigt und diskutiert.

## 5.1. Methodik

Die optimalen Tankstellenkonfigurationen werden mittels eines Optimierungsverfahrens gefunden. Eine HRS muss dabei die jeweiligen Flotten versorgen, aber auch spätere private Nachfrage in Höhe von etwa  $56 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$  decken können. Die Optimierung nutzt ein Simulationsmodell einer HRS und ihrer Komponenten sowie Modelle für verschiedene Strombezugsmöglichkeiten und Wasserstoffnachfrager. Die Optimierung wird jeweils für Kombinationen aus Bus-, Taxi- und Carsharing-Flotten durchgeführt, sodass für jede betrachtete Flottenkombination die dazu passende HRS-Auslegung identifiziert wird und die damit verbundenen Kosten bestimmt werden.

In Kapitel 5.1.1 werden das Optimierungsverfahren, die verwendeten Zielgrößen der Optimierung sowie die Anwendung des Algorithmus' beschrieben. Dieser nutzt zur Bewertung von HRS-Auslegungen ein Simulationsmodell einer HRS, das in Kapitel 5.1.2 vorgestellt wird.

### 5.1.1. Topologieoptimierung

Die Zusammensetzung einer H<sub>2</sub>-Initialzelle aus einzelnen Komponenten mit bestimmter Dimensionierung, wie beispielsweise ein Elektrolyseur mit einer bestimmten elektrischen Leistung oder ein Wasserstoffspeicher mit einer bestimmten Kapazität, wird im Folgenden als Topologie bezeichnet. Diese kann optimiert werden, indem die einzelnen Komponenten hinsichtlich ihrer Dimensionierung verändert oder gar ganz entfernt werden. Als Kriterium für Optimalität wird eine Evaluationsfunktion definiert, die die Güte jeder denkbaren Topologie quantifizieren kann. Ein solches Maß für die Güte könnten zum Beispiel Kosten sein. Eine Topologie wäre demnach dann optimal, wenn sie die niedrigsten Kosten unter allen denkbaren Topologien aufwiese. Soll neben geringen Kosten ein zusätzliches Ziel, zum Beispiel geringe Kosten bei ausbleibender Nachfrage, verfolgt werden, kann ein Mehrzieloptimierungsverfahren eingesetzt werden. Ein möglicher Ansatz für eine solche Mehrzieloptimierung ist, beide Ziele zu einem zu verschmelzen. Dazu kann jede Zielgröße mit einem Gewichtungsfaktor multipliziert werden, um die dann gewichteten Zielgrößen anschließend addieren zu können. Als Zielgröße der Optimierung wird dann die Summe aus beiden Zielgrößen verwendet. Dieser Ansatz ist jedoch nachteilig, unter anderem weil die Wichtigkeit beider Zielgrößen vorab bewertet werden muss. Deshalb wird für diese Arbeit ein anderes Mehrzieloptimierungsverfahren gewählt. Dieses basiert auf einem Genetischen Algorithmus (siehe Kapitel 3.5.2). Mit diesem Verfahren zu evaluierende Systemkonfigurationen werden Individuen genannt. Mehrere dieser Individuen bilden eine Generation. Auf Basis der Evaluationsergebnisse einer Generation werden Individuen ausgewählt, aus deren Eigenschaften neue Individuen einer folgenden Generation gebildet werden.

Die Anwendung der Methodik auf das hier beschriebene Problem erfolgt dergestalt, dass als Entscheidungsvariablen die zu dimensionierenden Größen der Tankstellen-

komponenten ausgewählt werden, wie beispielsweise die Nennleistung des Elektrolyseurs oder das Speichervolumen. Zielgrößen sind LCOH<sub>2</sub> der Tankstelle ohne private Nachfrage (LCOH<sub>2</sub><sub>ohne</sub>) sowie LCOH<sub>2</sub> der Tankstelle mit privater Nachfrage (LCOH<sub>2</sub><sub>mit</sub>). Als Evaluationsfunktion zur Bestimmung dieser Größen dient ein Simulationsmodell der Wasserstofftankstelle, mit dem ein Jahr in Stundenschrittweite simuliert wird. Das Modell berücksichtigt unter anderem Investitionsausgaben (Capex) jeder Komponente sowie fixe und variable Betriebskosten (Opex<sub>fix</sub> beziehungsweise Opex<sub>var</sub>). Zur Bestimmung der LCOH<sub>2</sub> kommt die Annuitätenmethode zur Anwendung (siehe Anhang C). Randbedingung der Optimierung ist, dass der Wasserstoffbedarf der jeweils betrachteten Fahrzeugflotten gedeckt werden muss. Zusätzlich muss die HRS in der Lage sein, später aufkommende private Nachfrage der HRS-Klasse „Very small“ in Höhe von etwa  $56 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$  zu bedienen.

Die Populationsgröße, also die Anzahl an Systemkonfigurationen, die innerhalb einer Generation evaluiert wird, beträgt mindestens 32. Es werden zunächst mindestens 20 Generationen auf Basis einer vereinfachten Evaluationsfunktion berechnet. Diese beinhaltet die Simulation der jeweiligen Tankstellenkonfiguration unter der Annahme, dass private Nachfrage auftritt. Aus den Simulationsergebnissen wird entsprechend die Zielgröße LCOH<sub>2</sub><sub>mit</sub> bestimmt und die Zielgröße LCOH<sub>2</sub><sub>ohne</sub> abgeschätzt. Die Abschätzung ersetzt einen erneuten Simulationsdurchlauf und verkürzt die erforderliche Berechnungszeit der Evaluation daher erheblich. Auf Basis des Optimierungsergebnisses, das in den 32 besten Systemkonfigurationen nach 20 Generationen besteht, wird im Anschluss eine erneute Optimierung gestartet. Diese nutzt die besten Systemkonfigurationen als Anfangs-Population und verwendet nun nicht mehr die vereinfachte Evaluationsfunktion. Stattdessen wird jede Systemkonfiguration während der Evaluation nun zwei Mal simuliert, einmal mit privater Nachfrage und einmal ohne. Nur Systemkonfigurationen, die auch im Fall mit privater Nachfrage jeder Zeit die Wasserstoffbedarfe decken können, werden als gültig angesehen. Der Optimierungsprozess wird auf diese Weise für mindestens 8 weitere Generationen fortgeführt.

Diese beschriebene Optimierung wird für verschiedene Flottenkonfigurationen durchgeführt. Die Anzahl an Carsharing-Fahrzeugen beträgt dabei entweder 0, 10, 20, 50, 100 oder 200, die Anzahl der Taxis entweder 0, 10, 20, 50 oder 100 und die Anzahl der Busse entweder 0, 1, 2, 5 oder 10. Folglich ergeben sich 150 Flottenkombinationen.

### 5.1.2. Simulationsmodell

Zur Evaluation von Systemkonfigurationen (Individuen) wird ein Simulationsmodell der H<sub>2</sub>-Initialzelle verwendet. Die zugrundeliegenden Modelle und das Simulationsframework werden in Kapitel 3.5.3 beziehungsweise Kapitel 3.5.1 beschrieben. Im Folgenden wird nun die in dieser Arbeit angewendete Auswahl, Parametrierung und Verknüpfung der Teilmodelle erläutert. Da Grüger et al. (2017) in vorangegangenen Untersuchungen [81] gezeigt haben, dass die Kopplung eines Elektrolyseurs mit WEA vorteilhaft ist, wird diese Betriebsweise hier ebenfalls angenommen (siehe auch

## 5. Auslegung einer H<sub>2</sub>-Initialzelle

Kapitel 3.3.2). Im Gegensatz zur genannten Untersuchung wird hier jedoch keine prä-diktive Betriebsstrategie angewendet, da diese die erforderliche Berechnungsdauer so stark ansteigen lassen würde, dass eine Topologieoptimierung nicht mehr möglich wäre. Das Simulationsmodell ist jedoch identisch aufgebaut.

Der erforderliche Wasserstoff wird mittels alkalischer Elektrolyse mit einem Ausgangsdruck von 45 bar hergestellt und in einem NDS bei maximal 45 bar gespeichert. Ein Wasserstoffverdichter kann das Druckniveau von Wasserstoff aus dem Speicher oder aus dem Elektrolyseur auf bis zu 1000 bar heben. Der Wasserstoff wird in einem HDS gespeichert. Von dort (oder direkt aus dem Verdichter) wird eine PKW-Zapfsäule versorgt. Deren Modell beinhaltet auch die Vorkühlung des Wasserstoffs. Auf diese Weise können Taxis, Carsharing-Fahrzeuge und private PKW versorgt werden. Da auch Busse betrachtet werden sollen, sind weitere Komponenten erforderlich. So wird in diesen Fällen im Modell ein weiterer Verdichter vorgesehen, der ebenfalls aus dem Elektrolyseur oder dem NDS gespeist wird. Damit wird Wasserstoff auf bis zu 500 bar verdichtet und anschließend in einem MDS gelagert. Die daran angeschlossene Zapfsäule für Busse erfordert keine Kühlung. Mitteldruckverdichter und -speicher werden mit den gleichen Modellen abgebildet wie Hochdruckverdichter und -speicher. Die Stromversorgung des Elektrolyseurs erfolgt entweder aus einer oder mehreren WEA oder aus dem Stromnetz der öffentlichen Versorgung. Von dort bezogener Strom wird auf dem Intraday-Spotmarkt eingekauft. Die Verdichter sowie die Vorkühlung werden ausschließlich über das Stromnetz versorgt, da angenommen wird, dass hier eine Versorgung zu jedem Zeitpunkt, auch kurzfristig, gewährleistet sein muss. Abbildung 5.2 zeigt die im Modell abgebildeten Komponenten und deren Verknüpfung.

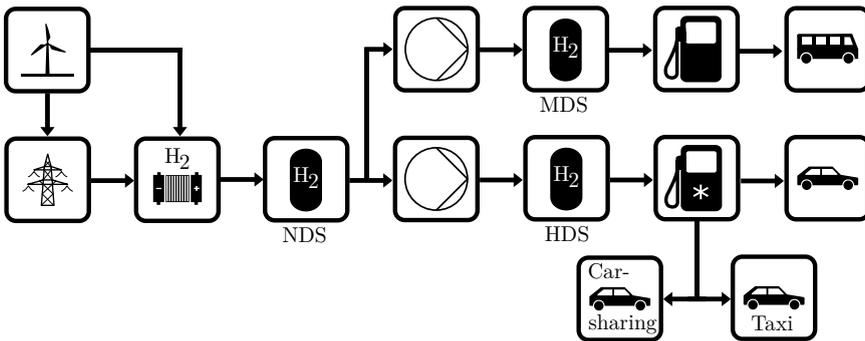


Abbildung 5.2.: Schematische Darstellung der Komponenten des Simulationsmodells. Hochdruck- (HDS), Mitteldruck- (MDS) und Niederdruckspeicher (NDS) sind mit Abkürzungen bezeichnet

Diese Modelle und deren Verknüpfung sind in ein Simulationsframework (siehe Kapitel 3.5.1) eingebettet. Im Rahmen dessen wird eine Simulation mit einer gewählten Schrittweite (hier: eine Stunde) und für einen gewählten Zeitraum (hier: ein Jahr)

durchgeführt. Das Framework ermöglicht dabei über die Wahl von Parametern, eine Betriebsstrategie festzulegen. Diese wird so gewählt, dass der Elektrolyseur, wann immer möglich, von den WEA bereitgestellte Energie nutzt, um Wasserstoff zu produzieren. Dafür wird der Elektrolyseur bei Bedarf auch im Überlastbereich bis zum 1,4-fachen der Nennleistung betrieben. Kann die von den WEA gelieferte Energie (oder ein Teil davon) nicht für die Wasserstoffproduktion genutzt werden, etwa, weil die WEA-Leistung die Maximalleistung des Elektrolyseurs übersteigt oder der produzierte Wasserstoff nicht durch einen Speicher oder Verdichter abgenommen werden könnte, wird sie in das Stromnetz eingespeist. Unterschreitet der Füllstand des NDS eine Grenze  $p_{\text{thres}}$ , ist auch Netzstrombezug des Elektrolyseurs erlaubt, um den Speicherstand wieder über diese Grenze zu heben. So soll sichergestellt werden, dass der Wasserstoffbedarf auch in Zeiten geringen Windaufkommens gedeckt werden kann. Würde gänzlich auf Netzstrom verzichtet, würde dies zu einer erheblichen Überdimensionierung der WEA führen. Wird Wasserstoff durch den Elektrolyseur produziert und nicht direkt zur Bedarfsdeckung verwendet, legt die Betriebsstrategie fest, welcher Speicher befüllt wird. Zunächst wird der NDS bis zu einem Mindestfüllstand  $p_{\text{min}}$  befüllt. Dann wird der MDS, sofern vorhanden, befüllt. Erst wenn dieser vollständig gefüllt ist, wird weiterer Wasserstoff in den NDS geleitet. Der HDS hat üblicherweise eine vergleichsweise geringe Speicherkapazität von etwa 40 kg und dient als Puffer während der Betankung, der unmittelbar danach wieder befüllt wird. Bei der gewählten Simulationsschrittweite von einer Stunde und der vergleichsweise geringen Speicherkapazität kann eine längerfristige Speicherfunktion des HDS nicht sinnvoll abgebildet werden. Der HDS wird daher für einen funktionierenden Betankungsvorgang zwar vorausgesetzt, sein Füllstand wird jedoch nicht simuliert. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass die in einer Stunde von PKW nachgefragte Wasserstoffmasse vollständig vom Hochdruckverdichter bereitgestellt werden muss.

Die Komponenten werden für jede Flottenkombination durch den Optimierungsalgorithmus gemäß den Eigenschaften der Individuen parametrisiert. Einige Parameter sind jedoch unveränderlich und gelten für alle Individuen gleichermaßen. Die angenommenen Strombezugsoptionen sind dabei besonders wichtig, da sie einen großen Einfluss auf die Kosten haben. Soll Strom aus WEA bezogen werden, so fallen im Allgemeinen sämtliche Steuern, Abgaben und Umlagen auf den bezogenen Strom an. Befinden sich die WEA jedoch in unmittelbarer Nähe zur Wasserstofftankstelle und sind sie per Direktleitung mit dem Elektrolyseur verbunden, liegt Eigenversorgung im Sinne von § 3 Nr. 19 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2017 vor und die Steuern, Abgaben und Umlagen werden reduziert. In Städten ist es allerdings in der Regel nicht möglich, WEA in der Nähe von Tankstellen zu errichten. Eigenversorgung wäre jedoch bei zentraler Elektrolyse in der Nähe von Windparks möglich. In dieser Arbeit wird vereinfachend davon ausgegangen, dass Eigenversorgung auch für Onsite-Elektrolyse möglich ist und die Verlegung eines neuen Erdkabels nicht erforderlich ist<sup>1</sup>. In Anhang D wird der Einfluss der Kosten eines Erdkabels abgeschätzt.

<sup>1</sup>Robinius et al. (2018) [149] diskutieren Literatur zu Kosten eines neu zu verlegenden Erdkabels. Für Deutschland bestehen demnach Schätzungen zwischen  $65\,000 \frac{\text{€}}{\text{km}}$  und  $140\,000 \frac{\text{€}}{\text{km}}$ .

## 5. Auslegung einer H<sub>2</sub>-Initialzelle

Bei Eigenversorgung verringert sich die EEG-Umlage gemäß § 61b Nr. 1 EEG 2017 auf 40 %. Dies entspricht  $0,02752 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ . Für in das Stromnetz eingespeisten Strom kann keine EEG-Vergütung in Anspruch genommen werden. Durch die Vermeidung der Netznutzung fallen keine Netzentgelte und netzentgeltbezogenen Umlagen, nämlich KWKG-Umlage, § 19 StromNEV-Umlage, Offshore-Haftungsumlage, Abschaltumlage und Konzessionsabgabe, an. Auch eine Belastung mit Stromsteuer ist gemäß §9 Abs.1 Nr. 1 StromStG in diesem Fall nicht gegeben. Die oben genannten Befreiungen von Stromnebenkosten gelten jedoch nicht für den aus dem Spotmarkt bezogenen Strom. Die anfallenden Stromnebenkosten sowie weitere Stromkostenbestandteile werden der Strompreisanalyse (Mai 2017) des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. [131] entnommen. Die Strombezugskosten werden von diesem Wert jedoch abgezogen, da statt eines Mittelwerts in der Simulation ein variabler Strompreis angenommen werden soll. Die verbleibenden Stromnebenkosten summieren sich auf  $0,13604 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ .

Neben den Strombezugskosten sind die Kostenparameter der verwendeten Komponenten von Bedeutung. Die Bestimmung der Kostenparameter ist in Anhang B dargestellt. In Tabelle 5.1 sind die Capex und Opex<sub>fix</sub> der Komponenten zusammengefasst. Variable Betriebskosten (Opex<sub>var</sub>) werden nicht vorab festgelegt, sondern ergeben sich aus dem simulierten Betrieb der Anlagen. Derartige Kosten sind beispielsweise die Stromnebenkosten (abhängig vom Strombezug) und die Strombeschaffungskosten (abhängig vom Strombezug und dessen jeweiligem Zeitpunkt). Die Capex des Elektrolyseurs werden gemäß einer Funktion in Abhängigkeit der elektrischen Nennleistung bestimmt (siehe Gleichung 5.1).

$$Capex_{\text{Ely}}(P_{\text{Ely}}) = 3013 \left( \frac{P_{\text{Ely}}}{1 \text{ kW}} \right)^{-0.115} \cdot \text{€} \quad (5.1)$$

mit

$$\begin{aligned} Capex_{\text{Ely}} &= \text{Capex eines Elektrolyseurs in €} \\ P_{\text{Ely}} &= \text{Elektrische Nennleistung des Elektrolyseurs in kW} \end{aligned}$$

Wesentliche technische Eigenschaften der Komponenten sind teilweise konstant, andere werden durch die Optimierung verändert und sind daher Entscheidungsvariablen. Zu den konstanten Eigenschaften gehören die Volllaststunden der WEA (2700 Stunden pro Jahr), der maximal förderbare Massenstrom der Verdichter ( $33,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ ) und der Energiebedarf der Vorkühlung ( $2,25 \frac{\text{kWh}}{\text{h}}$  im Standby und  $0,4 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ ). Der Energiebedarf der Verdichter hängt von den jeweiligen Eingangsdrücken ab. Die Volllaststunden der WEA entsprechen den erwarteten Volllaststunden der im Jahr 2017 neu installierten Onshore-WEA [150]. Für jede betrachtete Flottenkombination wird zudem die Randbedingung gewählt, dass die HRS-Konfiguration zusätzlich zur jeweiligen Flotte auch spätere private Nachfrager versorgen können muss. Die Nachfrage wird entsprechend der HRS-Klasse „Very small“ (siehe Tabelle 4.1) gewählt. Die zugrundeliegende Zeitreihe weist eine durchschnittliche tägliche Nachfrage von 52,6 kg auf (siehe Kapi-

Tabelle 5.1.: Kosten und Lebensdauer der Systemkomponenten, Prozentangaben beziehen sich auf Capex

Komponente	Capex	Opex <sub>fix</sub>	Lebensdauer
Windenergieanlagen	1547 $\frac{\text{€}}{\text{kW}}$	56 $\frac{\text{€ p.a.}}{\text{kW}}$	20 a
Niederdruckspeicher	631,6 $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$	1 % p.a.	30 a
Mitteldruckspeicher	874,3 $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$	1 % p.a.	30 a
Hochdruckspeicher	1143,9 $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$	1 % p.a.	20 a
Mitteldruckverdichter	316 384 €	5 % p.a.	20 a
Hochdruckverdichter	394 398 €	5 % p.a.	20 a
Zapfsäule	107 000 €	5 % p.a.	20 a
Vorkühlung	140 000 €	5 % p.a.	20 a
Elektrolyseur	siehe Gleichung 5.1	4 % p.a.	20 a

tel 4.1). Die Entscheidungsvariablen, ihre jeweiligen Bereiche und die Schrittweite, in denen der Optimierer Werte innerhalb der Bereiche wählen kann, sind in Tabelle 5.2 dargestellt. Je weiter die Bereiche und je feiner die Schrittweite gewählt werden, desto länger dauert die Optimierung. Dies bedeutet, dass bei einer gegebenen Beschränkung der maximalen Optimierungsdauer ein weiter gefasster Bereich und eine feinere Schrittweite dazu führen, dass am Ende des Prozesses die gefundenen Lösungen weiter vom Optimum entfernt sein können. Daher wird der hier gewählte Wertebereich der Entscheidungsvariablen nicht beliebig weit gefasst, sondern möglichst sinnvoll eingegrenzt. Es wird davon ausgegangen, dass die WEA-Leistungen nicht zwangsläufig der Nennleistung von Anlagen entsprechen müssen, sondern auch definierte Anteile der bereitgestellten WEA-Energie genutzt werden können (analog sogenannten Kraftwerksscheiben). Übliche Nennleistungen von Onshore-WEA betragen zwischen 2 MW und 4 MW [151]. Die gewählte obere Grenze der WEA-Leistung entspricht also etwa 3 Anlagen mittlerer Leistung. Die willkürlich wirkenden Bereiche und Schrittweiten der Nennleistung des Elektrolyseurs sind mit dem zugrundeliegenden Modell begründet. Dieses fußt auf der Abbildung eines existierenden Elektrolyseurs an einer Wasserstofftankstelle [107], der eine Nennleistung von 454 kW aufweist. Eine Änderung der Elektrolyseleistung erfolgt hier über eine Skalierung dieser Komponente. Die gewählte untere Grenze entspricht beispielsweise 40 % der ursprünglichen Nennleistung. Ein kleinerer Wert wird nicht gewählt, da Nennleistungen kleiner als 150 kW selbst für die in allen Flottenkombinationen minimal auftretende Nachfrage nur bei unrealistisch hohen Vollaststunden des Elektrolyseurs von etwa 8000 Stunden pro Jahr ausreichend viel Wasserstoff produzieren könnten. Die obere Grenze der Elektrolyse-

## 5. Auslegung einer H<sub>2</sub>-Initialzelle

leistung entspricht einer Verneunfachung des zugrundeliegenden Elektrolyseurs. Die Volumina der Wasserstoffspeicher sind angelehnt an die technischen Eigenschaften einer bestehenden Wasserstofftankstelle (etwa 95 m<sup>3</sup> Volumen des NDS und etwa 12 m<sup>3</sup> Volumen des MDS). Da die Komponenten MDS und Mitteldruckverdichter nur erforderlich und sinnvoll sind, wenn Busse Teil der jeweiligen Flottenkombination sind, besteht hier für den Optimierer die Möglichkeit, vollständig auf diese Komponenten zu verzichten. Neben den genannten technischen Eigenschaften der Komponenten WEA, Elektrolyseur, Speicher und Verdichter gibt es auch zwei Entscheidungsvariablen, die den NDS betreffen und Einfluss auf den Betrieb haben. Wenn der Druck des NDS unterhalb von  $p_{\text{thres}}$  liegt, darf auch Netzstrom zur Versorgung des Elektrolyseurs verwendet werden. Solange der Druck des NDS oberhalb von  $p_{\text{min}}$  liegt, wird produzierter Wasserstoff zunächst in den MDS geleitet. Erst wenn diese Bedingung nicht mehr erfüllt oder der MDS gefüllt ist, wird produzierter Wasserstoff im NDS gespeichert.

Tabelle 5.2.: Entscheidungsvariablen sowie ihre Bereiche und Schrittweiten

Entscheidungsvariable	Bereich	Schrittweite
Nennleistung der WEA	0 bis 9000 kW	100 kW
Nennleistung des Elektrolyseurs	182 bis 4086 kW	91 kW
Volumen des Niederdruckspeichers	20 bis 860 m <sup>3</sup>	20 m <sup>3</sup>
Volumen des Mitteldruckspeichers	0 bis 120 m <sup>3</sup>	1,2 m <sup>3</sup>
Anzahl Mitteldruckverdichter	0 bis 3	1
$p_{\text{min}}$ (Mindestfüllstand)	10 bis 30 bar	5 bar
$p_{\text{thres}}$ (Grenze Netzbezug)	10 bis 30 bar	5 bar

Die Anzahl der erforderlichen Zapfsäulen für Busse und PKW muss nicht mittels Optimierung bestimmt werden, sondern kann auf Basis der zugrunde gelegten Nachfrager ermittelt werden. So wird für jede Flottenkombination die durchschnittlich pro Tag nachgefragte Wasserstoffmasse bestimmt. Auf Basis derer wird die Anzahl der PKW-Zapfsäulen aus der H<sub>2</sub> Mobility-Tankstellenklassifizierung (siehe Tabelle 4.1) abgeleitet. Bei bis zu 168  $\frac{\text{kg}}{\text{d}}$  genügt demnach eine Zapfsäule, für bis zu 336  $\frac{\text{kg}}{\text{d}}$  sind zwei und bei bis zu 504  $\frac{\text{kg}}{\text{d}}$  drei Zapfsäulen ausreichend. Höhere Wasserstoffbedarfe erfordern vier Zapfsäulen. Die Anzahl der HDS sowie die der Hochdruckverdichter entspricht der Anzahl der Zapfsäulen. Es wird davon ausgegangen, dass in jedem Fall ein Vorkühler ausreichend ist. Die Anzahl der erforderlichen Zapfsäulen für Busse ergibt sich direkt aus der jeweils gewählten Flottengröße (siehe Kapitel 4.2.3).

## 5.2. Ergebnisse

Ergebnis der Topologieoptimierung sind einerseits die gefundenen Systemauslegungen und andererseits die resultierenden LCOH<sub>2</sub>. Diese werden in Kapitel 5.2.1 dargestellt und für die verschiedenen Flottentypen und -größen diskutiert. Aus Sicht des Betreibers der H<sub>2</sub>-Initialzelle sind jedoch nicht nur die spezifischen Kosten (LCOH<sub>2</sub>) wichtig, sondern die Wirtschaftlichkeit der Wasserstofftankstelle insgesamt ist entscheidend. Diese wird in Kapitel 5.2.2 aus den Optimierungsergebnissen abgeleitet. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden die Einflüsse verschiedener Parameter und Randbedingungen untersucht (siehe Kapitel 5.2.3).

### 5.2.1. Wasserstoffgestehungskosten und Systemauslegung

Die Optimierung jeder der 150 Flottenkombinationen erzeugt jeweils eine Pareto-Front, bestehend aus möglichen HRS-Konfigurationen. Jede Konfiguration stellt einen anders ausgeprägten Kompromiss hinsichtlich der beiden Ziele Wasserstoffgestehungskosten mit privater Nachfrage (LCOH<sub>2mit</sub>) und ohne private Nachfrage (LCOH<sub>2ohne</sub>) dar. Die Flottenkombinationen werden im Folgenden abgekürzt bezeichnet. So wird beispielsweise eine Kombination aus 10 CarSharing-Fahrzeugen, 20 Taxis und 5 Bussen S10-T20-B5 genannt. Da die Ergebnisse nicht für jede der 150 Flottenkombinationen im Detail diskutiert werden können, soll hier beispielhaft die Kombination S20-T20-B1 betrachtet werden. Deren Pareto-Front ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Die Auslegungen sind mit steigenden LCOH<sub>2ohne</sub> und mit sinkenden LCOH<sub>2mit</sub> aufsteigend nummeriert. Es kann festgestellt werden, dass für jede der Auslegungen die LCOH<sub>2ohne</sub> höher sind als die LCOH<sub>2mit</sub>. Dies ist plausibel, da die Capex der jeweiligen Auslegung konstant sind und auf die jeweils abgegebene Wasserstoffmasse umgelegt werden, um die LCOH<sub>2</sub> zu erhalten. Ist die abgegebene Wasserstoffmasse größer (im Falle privater Nachfrage), sind die spezifischen Kosten, also die LCOH<sub>2</sub>, geringer. Außerdem wird deutlich, dass keine Auslegung das alleinige Optimum darstellt, da keiner der Punkte der Pareto-Front hinsichtlich beider Ziele besser ist als ein anderer Punkt der Front. Vielmehr geht eine Verbesserung hinsichtlich des einen Ziels mit einer Verschlechterung hinsichtlich des anderen einher.

Die Eigenschaften der Auslegungen, also die Werte ihrer Entscheidungsvariablen, sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Während einige Eigenschaften für alle Auslegungen gleich sind, wird die Nennleistung der installierten WEA entlang der Pareto-Front schrittweise von 600 kW auf 1000 kW erhöht. Sie übersteigt die Nenn- und Maximalleistung des Elektrolyseurs in jeder Auslegung. Für den Fall, dass private Nachfrage auftritt (LCOH<sub>2mit</sub>), kann mit steigender WEA-Leistung der Anteil von Strom aus Windenergie erhöht und teurerer Spotmarkt-Strom verdrängt werden. Mit steigender WEA-Leistung steigt jedoch auch der nicht für Elektrolyse nutzbare Strom aus Windenergie. Da dessen Verkauf am Spotmarkt die Kosten aus Errichtung und Betrieb der WEA grundsätzlich nicht decken kann, wirken die Mehrkosten zusätzli-

## 5. Auslegung einer $H_2$ -Initialzelle

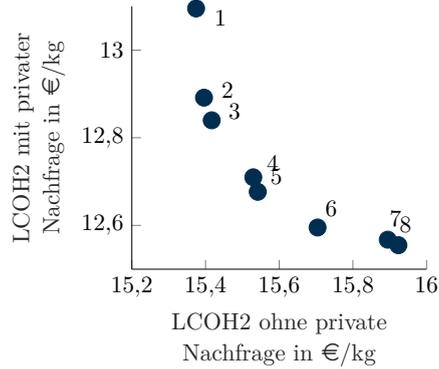


Abbildung 5.3.: Pareto-Front der Flottenkombination S20-T20-B1, bestehend aus verschiedenen Systemauslegungen, die jeweils unterschiedliche Kompromisse hinsichtlich der beiden Ziele darstellen. Die Nummerierung dient der Diskussion der jeweiligen Systemauslegungen

cher WEA-Leistung der Kostensenkung durch Verdrängung von Spotmarkt-Strom entgegen. WEA-Leistungen größer 1000 kW sind daher nachteilig und nicht Bestandteil pareto-optimaler Auslegungen. Für den Fall, dass private Nachfrage ausbleibt ( $LCOH2_{ohne}$ ), sind steigende WEA-Leistungen über 600 kW nachteilig, da die Nachteile aus nicht für Elektrolyse nutzbarer Windenergie die Vorteile der Verdrängung von Spotmarkt-Strom übersteigen.

Tabelle 5.3.: Entscheidungsvariablen der Punkte der Pareto-Front von Flottenkombination S20-T20-B1

Entscheidungsvariable	Auslegung							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Nennleistung WEA in kW	600	700	700	800	800	900	1000	1000
Nennleistung Elektrolyse in kW				363				
NDS-Speichervolumen in $m^3$	60	80	60	80	60	60	60	80
MDS-Speichervolumen in $m^3$				3,6				
Anzahl Mitteldruckverdichter				1				
$p_{min}$ (Mindestfüllstand) in bar				15				
$p_{thres}$ (Grenze Netzbezug) in bar				10				

Da keine der Auslegungen geringere WEA-Leistungen als 600 kW aufweist, kann geschlossen werden, dass geringere Leistungen ebenfalls nachteilig gegenüber einer Auslegung mit 600 kW sind. In diesem Fall überwiegen die Nachteile des höheren Anteils von Spotmarkt-Strom.

Die Auslegungen unterscheiden sich jedoch nicht nur hinsichtlich der WEA-Leistung, sondern auch im Bezug auf das Volumen des NDS. Dieses beträgt in den meisten Auslegungen  $60 \text{ m}^3$ , jedoch bestehen teils zusätzlich Auslegungen mit jeweils identischer WEA-Leistung aber einem Speichervolumen von  $80 \text{ m}^3$  (Auslegung 2, 4 und 8). Ein größeres Speichervolumen führt zu höheren Kosten des Speichers, kann die LCOH<sub>2</sub> jedoch senken, wenn durch die größere Speicherkapazität Netzstrombezug verringert und die Nutzung von WEA-Strom erhöht werden kann. Bei vergleichsweise geringen WEA-Leistungen führt ein größeres Speichervolumen zu Nachteilen hinsichtlich LCOH<sub>2,mit</sub>, da ohnehin sehr große Teile des WEA-Stroms für Elektrolyse genutzt werden können und mehr Speichervolumen nur einen geringen Zusatznutzen bedingt. Umgekehrt ist ein größer dimensionierter Speicher in diesem Fall vorteilhaft hinsichtlich LCOH<sub>2,ohne</sub>, da bei ausbleibender privater Nachfrage häufiger WEA-Strom verfügbar ist, auch wenn keine Wasserstoffnachfrage besteht. Mit einem größer dimensionierten Speicher kann der Strom dennoch zur Wasserstoffproduktion genutzt werden, da dieser im Speicher gelagert werden kann. Auf diese Weise kann genug Spotmarkt-Strom durch WEA-Strom ersetzt werden, um die Mehrkosten des größeren Speichers zu kompensieren. Diese Effekte schwächen sich mit steigender WEA-Leistung jeweils ab und kehren sich bei Auslegungen mit einer WEA-Leistung von 1000 kW sogar um: Mit steigender WEA-Leistung steigt auch der Nutzen zusätzlicher Speicherkapazität, weil so noch größere Teile des Wasserstoffs mit Windenergie statt mit Netzstrom produziert werden können. Dies gilt jedoch nur, wenn der zusätzlich speicherbare Wasserstoff auch abgesetzt werden kann, was nur mit privater Nachfrage der Fall ist. Im Fall ohne private Nachfrage sinkt deshalb der Nutzen zusätzlicher Speicherkapazität.

### Vergleich der Flottenkombinationen

Um Flottenkombinationen vergleichen zu können, wird aus der Pareto-Front jeder Kombination für die weitere Betrachtung der jeweils beste Punkt hinsichtlich des ersten Ziels (LCOH<sub>2,ohne</sub>) ausgewählt. Für die diskutierte Kombination S20-T20-B1 ist dies der mit 1 nummerierte Punkt. Diese Auswahl wird getroffen, da in dieser Arbeit die Initialphase des Infrastrukturaufbaus betrachtet wird, in der keine oder kaum private Nachfrage vorhanden ist. Trotz der Auswahl nur einer Auslegung je Flottenkombination können nicht alle Kombinationen gleichzeitig dargestellt werden. Abbildung 5.4 zeigt die LCOH<sub>2,ohne</sub> für eine Auswahl von Flottenkombinationen. Da nicht für jede denkbare Flottengröße eine Optimierung durchgeführt wurde, findet für die nicht betrachteten Flottengrößen eine kubische Interpolation statt. Als Stützstellen der Interpolation dienen die bestehenden Flottenkombinationen, die in der Abbildung markiert sind.

## 5. Auslegung einer H<sub>2</sub>-Initialzelle

Betrachtet man die Ergebnisse für Kombinationen ohne Taxis (Abbildung 5.4a), so fallen die im Vergleich sehr hohen LCOH<sub>2</sub> im Fall kleiner Flotten auf. Dies kann damit begründet werden, dass die Gesamtkosten auf die an Fahrzeuge abgegebene Wasserstoffmasse bezogen werden, um die LCOH<sub>2</sub> zu bilden. Ist die abgegebene Masse gering, sind bei gleichen Gesamtkosten die LCOH<sub>2</sub> entsprechend höher als für größere Flotten. Für den Fall, dass gar keine Flotten vorhanden sind, sind die LCOH<sub>2</sub> entsprechend unendlich. Allerdings wird bei kleineren Flotten nicht nur weniger Wasserstoff abgegeben, es muss auch weniger Wasserstoff produziert und gespeichert werden, die Tankstellen samt WEA sind also auch kleiner dimensioniert und somit kostengünstiger. Die Vermutung liegt nahe, dass die LCOH<sub>2</sub> deshalb für größere und kleinere Flotten annähernd gleich sein müssten. Tatsächlich ist eine Randbedingung der Optimierung jedoch, dass die Kapazität der HRS auch für private Nachfrage ausreichend sein muss. Daher ist jede Auslegung überdimensioniert, was mit entsprechenden Mehrkosten einhergeht. Im Falle kleiner Flotten können diese Mehrkosten auf weniger Wasserstoff umgelegt werden als bei größeren Flotten. Deshalb zeigen die Ergebnisse, dass die LCOH<sub>2</sub> umso geringer ausfallen je größer die Flotten sind.

Dies gilt zwar grundsätzlich auch für Kombinationen aus Carsharing-PKW und Taxis aber ohne Busse (siehe Abbildung 5.4b), jedoch nicht ohne Einschränkung für die Kombination S200-T20-B0, deren LCOH<sub>2</sub> über denen von S200-T10-B0 liegen. Diese Auffälligkeit kann damit begründet werden, dass diese Flottengröße zu einer Wasserstoffnachfrage führt, die in mindestens einer Stunde des Jahres knapp den von einem Verdichter maximal förderbaren Massenstrom übersteigt. Deshalb müssen für diese Auslegung zwei Verdichter vorgesehen werden, die dann jedoch entsprechend gering ausgelastet sind. Die zusätzlichen Kosten für den zweiten Verdichter werden auf eine gegenüber dem Fall mit 10 Taxis nur geringfügig höhere Wasserstoffmasse umgelegt, sodass die LCOH<sub>2</sub> vergleichsweise hoch ausfallen.

Es kann festgestellt werden, dass Taxis je Fahrzeug die LCOH<sub>2</sub> stärker senken können als Carsharing-PKW, da sie einen höheren Wasserstoffbedarf haben. Dies gilt umso mehr für Busse, die je Fahrzeug einen erheblich höheren Wasserstoffbedarf als PKW aufweisen. Ab einer Flottengröße von 5 Bussen oder 70 Taxis können die LCOH<sub>2</sub> nur noch marginal gesenkt werden. Entsprechend sind die LCOH<sub>2</sub> für jede Flottenkombination, die 10 Busse beinhaltet (siehe Abbildung 5.4f) vergleichsweise niedrig. Insgesamt sind die LCOH<sub>2</sub> als hoch zu bewerten, da Wasserstoff gegenwärtig für  $7,98 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  netto verkauft wird<sup>2</sup>. Dieser Wert wird für keine Flottenkombination erreicht, der geringste Wert beträgt  $10,16 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  im Fall S200-T100-B10.

---

<sup>2</sup>Dieser Preis wurde von der Clean Energy Partnership festgelegt und orientierte sich zum Zeitpunkt der Festlegung an den streckenbezogenen Mobilitätskosten konventioneller Kraftstoffe.

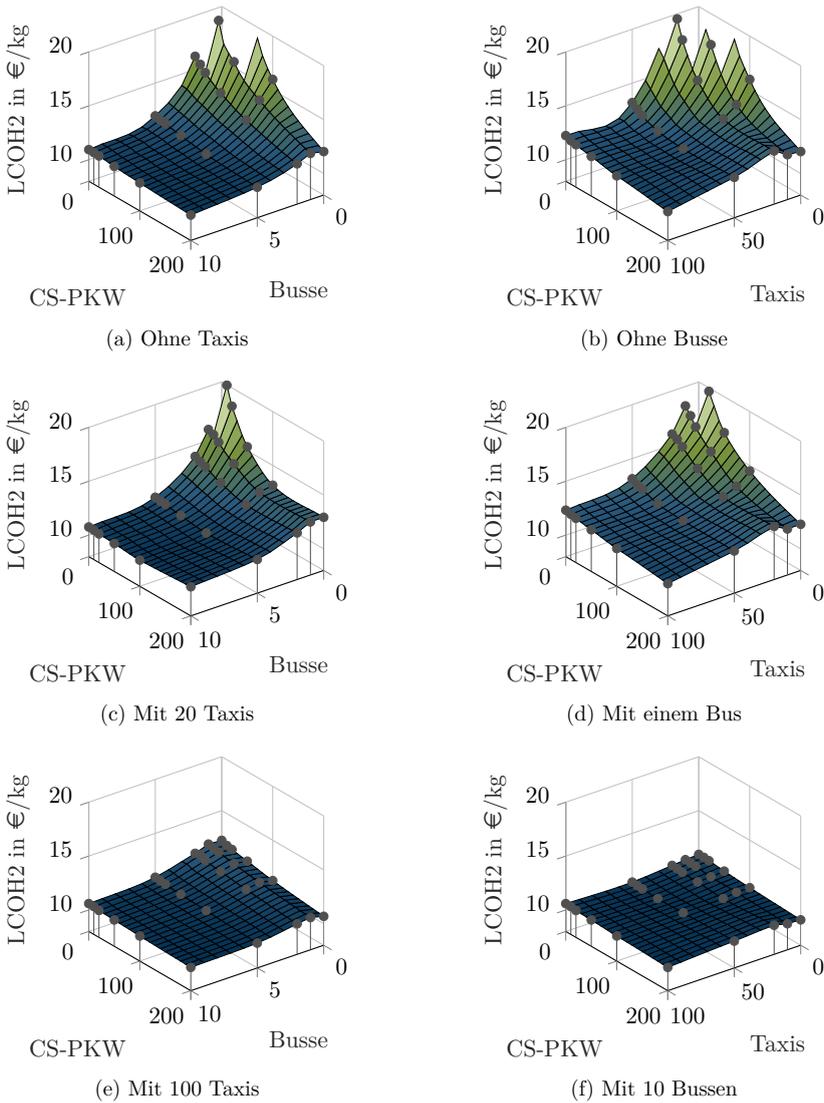


Abbildung 5.4.: Netto- $H_2$ -Gestehungskosten (LCOH<sub>2</sub>) für den Fall ohne private Nachfrage und verschiedene Flottenkombinationen aus Carsharing-PKW (CS-PKW), Taxis und Bussen. Datenpunkte mit LCOH<sub>2</sub> über  $20 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  sind ausgeblendet, Werte an nicht markierten Stellen basieren auf Interpolation

## 5. Auslegung einer $H_2$ -Initialzelle

Während die verschiedenen Flottenkombinationen hinsichtlich der LCOH<sub>2</sub> einen weitestgehend kontinuierlichen Verlauf aufweisen, können sich die zugrundeliegenden Dimensionierungen der Tankstellenkomponenten stärker unterscheiden. Abbildung 5.5 zeigt ausgewählte Entscheidungsvariablen der Optimierung, also Eigenschaften der jeweiligen Tankstellenauslegung, für verschiedene Flottenkombinationen (die Achsrichtungen sind für bessere Lesbarkeit gegenüber Abbildung 5.4 teils umgekehrt). Die Nennleistungen der WEA (Abbildung 5.5a) und des Elektrolyseurs (Abbildung 5.5b) steigen nahezu linear mit der Flottengröße. Die Speichervolumina des NDS und des MDS zeigen hingegen einen weniger gleichförmigen Verlauf. Dies kann damit begründet werden, dass auch der NDS eine Speicherfunktion für die Versorgung von Bussen übernehmen kann und die Speichervolumina teils komplementär sind. So steigt beispielsweise das Volumen des MDS vom Fall S0-T0-B2 auf S0-T0-B5 nur geringfügig und stattdessen das Volumen des NDS. Zusätzlich gibt es Wechselwirkungen mit der Anzahl der Mitteldruckverdichter. Auslegungen mit zwei Mitteldruckverdichtern sind in Abbildung 5.5d mit ausgefüllten Markierungen gekennzeichnet, während Fälle mit nur einem oder keinem Verdichter mit nicht ausgefüllten Markierungen versehen sind. Es wird ersichtlich, dass insbesondere die Auslegungen mit zwei Mitteldruckverdichtern (S10-T0-B10, S20-T0-B10 und S200-T0-B10) zu einem auffälligen Verlauf der Speichervolumina führen. So werden Busse im Fall S20-T0-B10 zu einem Teil aus dem MDS und zu einem anderen Teil direkt aus dem Elektrolyseur oder dem NDS mit Hilfe eines zweiten Mitteldruckverdichters versorgt. In diesen Fällen weist der NDS auffällig große Volumina auf. Die scheinbar willkürliche Wahl einer Auslegung mit zwei Verdichtern und einem vergleichsweise geringen MDS-Volumen für diese Flottenkombinationen ist einer alternativen Auslegung mit nur einem Mitteldruckverdichter und einem größeren MDS hinsichtlich der LCOH<sub>2</sub> in diesen Fällen überlegen.

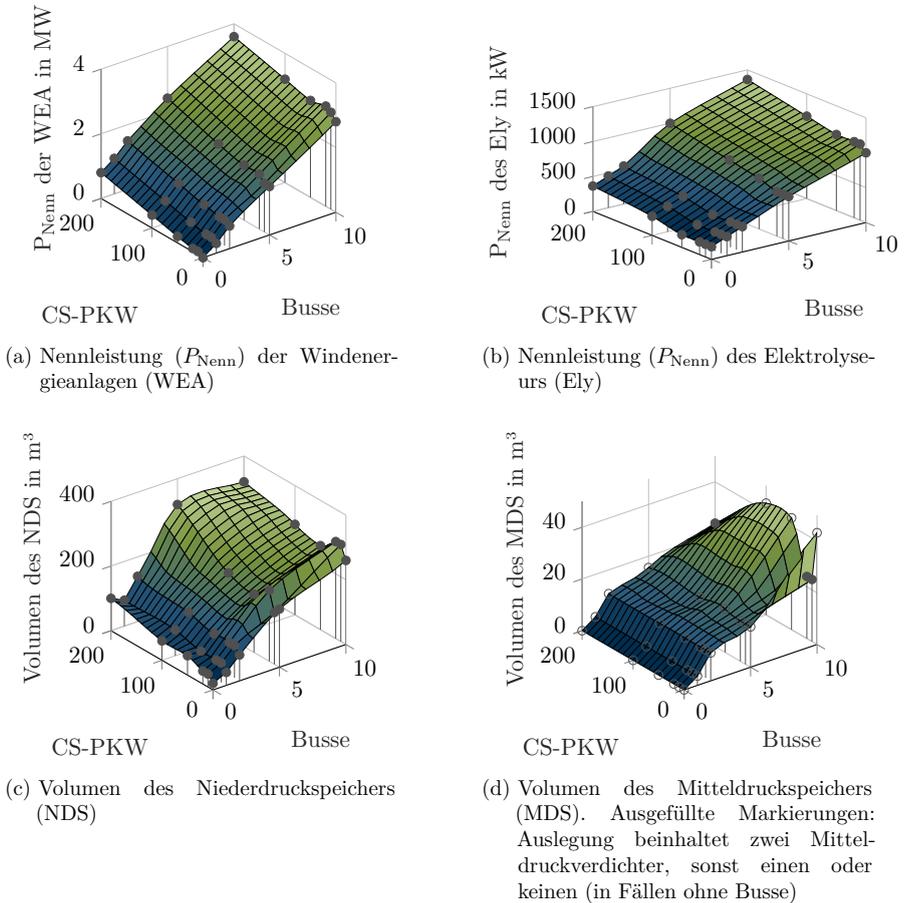


Abbildung 5.5.: Ausgewählte Auslegungsparameter für verschiedene Flottenkombinationen aus Carsharing-PKW (CS-PKW) und Bussen als Ergebnis der Optimierung. Werte an nicht markierten Stellen basieren auf Interpolation

### Einfluss von privater Nachfrage

Die bisher gezeigten Ergebnisse beziehen sich auf eine Situation ohne private Nachfrage, obwohl die ermittelten Auslegungen eine solche Nachfrage zusätzlich bedienen könnten. Es besteht demnach eine Überdimensionierung. In welchem Maße später aufkommende private Nachfrage die LCOH<sub>2</sub> verändert, ist in Abbildung 5.6 für ausgewählte Flottenkombinationen gezeigt, indem das zweite Optimierungsziel, LCOH<sub>2mit</sub> ausgewertet wird. Die LCOH<sub>2</sub> für den Fall fehlender privater Nachfrage sind für bessere Vergleichbarkeit transparent dargestellt. Die LCOH<sub>2</sub> sinken für alle gezeigten Flottenkombinationen, wenn private Nachfrage in Höhe des zuvor definierten Profils gemäß HRS-Klasse „Very small“ aufkommt. Besonders stark sinken sie für den Fall kleiner Flotten, da hier die relativ größte Überdimensionierung besteht. Dennoch können Flotten die LCOH<sub>2</sub> gegenüber einer Auslegung nur für private Nachfrage (S0-T0-B0) senken. Beispielsweise sinken die LCOH<sub>2</sub> für eine Flotte aus 10 Taxis gegenüber dem Referenzfall ohne Flotten um 2,54  $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$  entsprechend 14%. Auch mit privater Nachfrage kann keine Wirtschaftlichkeit erreicht werden, da die geringsten LCOH<sub>2</sub> 10,05  $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$  betragen (S200-T100-B10).

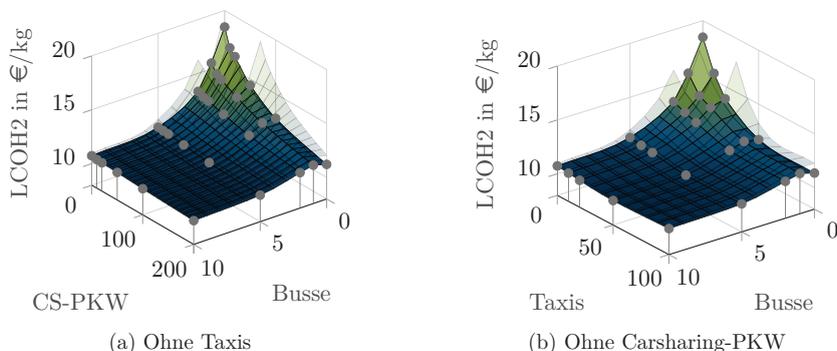
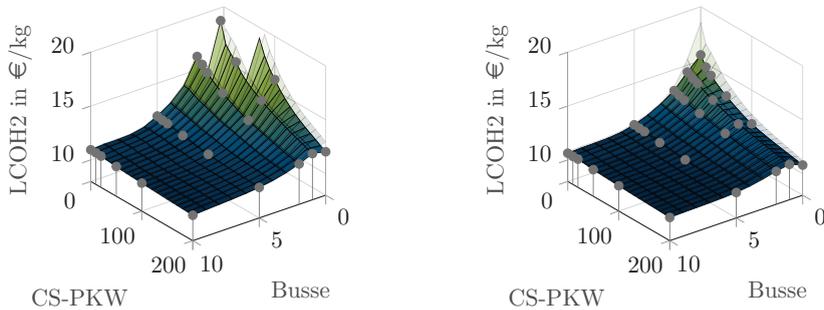


Abbildung 5.6.: Netto-H<sub>2</sub>-Gestehungskosten (LCOH<sub>2</sub>) für den Fall mit privater Nachfrage und ohne (transparent) sowie verschiedene Flottenkombinationen aus Carsharing-PKW (CS-PKW), Taxis und Bussen. Die zugrundeliegenden Auslegungen der Tankstellen sind für den Fall ohne private Nachfrage optimiert

Alternativ zu den gezeigten Auslegungen ist es möglich, die Tankstellen so auszulegen, dass sie für den Fall privater Nachfrage optimal sind. Die Ergebnisse zeigen, dass dafür in den meisten Fällen sowohl die Leistung des Elektrolyseurs als auch der WEA angehoben werden, um eine für die gestiegene Wasserstoffnachfrage optimale Konfiguration zu erhalten. In Abbildung 5.7 werden sowohl LCOH<sub>2ohne</sub> (Abbildung 5.7a) als auch LCOH<sub>2mit</sub> (Abbildung 5.7b) derartiger Auslegungen mit den bisher diskutierten verglichen. In beiden Fällen kann festgestellt werden, dass die für den jeweiligen Fall optimierten Auslegungen (opak) den für den jeweils anderen Fall optimierten

Auslegungen überlegen sind. Die größten prozentualen Verringerungen der LCOH<sub>2</sub> liegen bezüglich LCOH<sub>2mit</sub> und LCOH<sub>2ohne</sub> bei jeweils 16 % (S0-T0-B0).



(a) Für den Fall ohne private Nachfrage. Transparent: Auslegungen sind für den Fall mit privater Nachfrage optimiert

(b) Für den Fall mit privater Nachfrage. Transparent: Auslegungen sind für den Fall ohne private Nachfrage optimiert

Abbildung 5.7.: Netto-H<sub>2</sub>-Gestehungskosten (LCOH<sub>2</sub>) für den Fall ohne private Nachfrage (links) und mit (rechts) und verschiedene Flottenkombinationen aus Carsharing-PKW (CS-PKW) und Bussen. Die nicht für den jeweiligen Fall optimierten Auslegungen sind transparent dargestellt

### 5.2.2. Wirtschaftlichkeit

Für den Betreiber einer HRS sind die LCOH<sub>2</sub> zwar ein wichtiger Indikator, entscheidend ist jedoch die Wirtschaftlichkeit der HRS. Diese ist gegeben, wenn die Erlöse aus dem Betrieb der HRS die Kosten übersteigen. Zieht man vom Erlös aus dem Verkauf von Wasserstoff zum gegenwärtigen Preis von  $7,98 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  die LCOH<sub>2</sub> ab, erhält man den spezifischen Gewinn. Da die LCOH<sub>2</sub> für jede betrachtete Flottenkombination größer als der Verkaufspreis sind, entsteht Verlust. Multipliziert man den spezifischen Verlust mit der in einem Jahr verkauften Wasserstoffmasse, erhält man den jährlichen Verlust aus dem Betrieb der Tankstelle. Da die LCOH<sub>2</sub> im Fall S0-T0-B0 unendlich sind und kein Wasserstoff verkauft wird, kann der Verlust hier direkt aus der berechneten Annuität bestimmt werden.

#### Vergleich der Flottenkombinationen

Sowohl die jährliche verkaufte Wasserstoffmasse als auch die LCOH<sub>2</sub> hängen von der Flottenzusammensetzung ab. Abbildung 5.8 zeigt die jährlichen Verluste für ausgewählte Flottenkombinationen. Der Fall S0-T0-B0 beinhaltet den Aufbau einer

## 5. Auslegung einer H<sub>2</sub>-Initialzelle

Wasserstofftankstelle zur Deckung einer Wasserstoffnachfrage von privaten Fahrzeugbetreibern von durchschnittlich  $52,6 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$ . Da angenommen wird, dass die Nachfrage zunächst ausbleibt, führen der Aufbau und Betrieb der Tankstelle zu jährlichen Verlusten in Höhe von 164 700 €. Diese Konfiguration ohne Flotten kann als Referenzfall für die Bewertung eines Flottenbetriebs angesehen werden. Alle Flottenkombinationen mit mindestens so hohen Verlusten werden in der Abbildung im hellsten Farbton dargestellt. Fälle mit geringeren Verlusten sind dunkler dargestellt, wobei Verluste kleiner 140 000 € dunkelblau dargestellt werden. Werden ausschließlich Carsharing-PKW eingesetzt, können die Verluste für Flotten mit mindestens 20 Fahrzeugen gegenüber dem Referenzfall reduziert werden (siehe Abbildung 5.8a). Die mit 151 700 € geringsten jährlichen Verluste weist eine Flotte mit 60 Carsharing-PKW auf. Reine Taxiflotten reduzieren die Verluste bei Flottengrößen zwischen 10 und 50 Fahrzeugen. Die mit 156 300 € geringsten jährlichen Verluste entstehen bei einer Flotte aus 10 Taxis. Für beide Flottentypen kann mit wenigen Ausnahmen beobachtet werden, dass mit steigender Flottengröße die Verluste zunächst reduziert werden, während sie bei größeren Flotten wieder ansteigen. Dies kann mit zwei sich überlagernden Effekten erklärt werden. Einerseits steigt mit größer werdenden Flotten die Auslastung, was die LCOH<sub>2</sub>, also die Verluste je Kilogramm Wasserstoff, reduziert. Mit steigender Flottengröße schwächt sich dieser Effekt ab. Andererseits steigt die Wasserstoffnachfrage mit der Flottengröße, was zu einer Erhöhung der absoluten Verluste führt. Bei kleineren Flotten ist der erste Effekt dominant, was sich bei größeren Flotten umkehrt. Die in Abbildung 5.4b beobachteten vergleichsweise hohen LCOH<sub>2</sub> im Fall S200-T20-B0 spiegeln sich hier in vergleichsweise hohen jährlichen Verlusten wider. Die untersuchten Busflotten führen unter den gewählten Randbedingungen zu höheren Verlusten als im Referenzfall (siehe Abbildung 5.8b). Die mit 235 700 € geringsten jährlichen Verluste entstehen bei nur einem Bus.

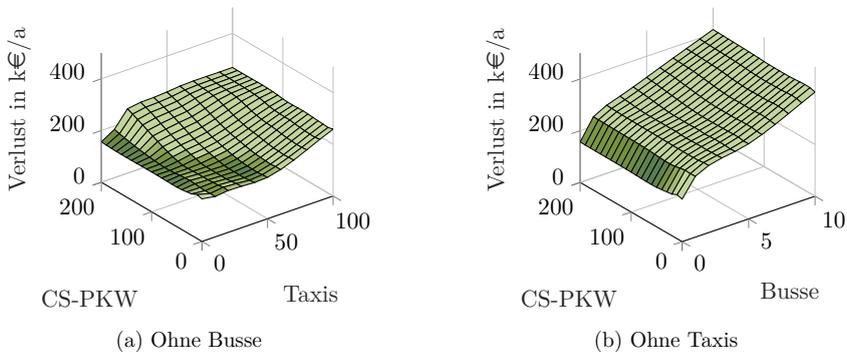
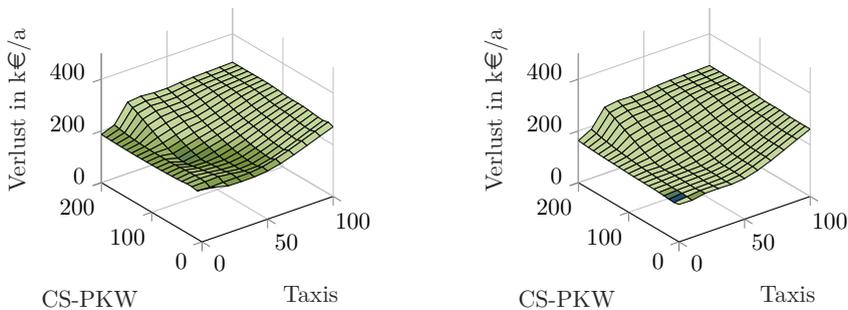


Abbildung 5.8.: Jährliche Verluste des HRS-Betriebs für Flottenkombinationen aus Carsharing-PKW (CS-PKW), Taxis und Bussen

### Wirtschaftlichkeit im Falle privater Nachfrage

Sollte zu einem späteren Zeitpunkt private Nachfrage aufkommen und die Konfiguration der Tankstelle unverändert bleiben, so verändern sich die Verluste. Abbildung 5.9a zeigt die sich dann einstellenden jährlichen Verluste für ausgewählte Flottenkombinationen. Diese werden mit dem hellsten Farbton eingefärbt, wenn ihre LCOH<sub>2</sub> größer oder gleich denen des Referenzfalls sind und mit einem dunklen blau, wenn ihre Verluste geringer als 140 000 € pro Jahr sind. Insgesamt erhöhen sich die Verluste für alle Flottenkombinationen gegenüber dem Fall ohne private Nachfrage. Dies scheint zunächst verwunderlich, da die Unterauslastung der HRS verringert und sie gemäß ihrer Kapazität betrieben wird. Der Grund für die steigenden Verluste ist, dass die WEA passend zu einem Fall ohne private Nachfrage dimensioniert sind. Zusätzlich benötigter Wasserstoff muss deshalb unter hauptsächlichlicher Nutzung von Spotmarkt-Strom hergestellt werden. Die Grenzkosten für die Wasserstoffproduktion mit Spotmarkt-Strom sind jedoch höher als der Verkaufspreis, sodass jedes weitere hergestellte und verkaufte Kilogramm Wasserstoff die Verluste erhöht. Dies trifft besonders auf den Referenzfall ohne Flotten zu, da dessen Auslegung gar keine WEA beinhaltet. Entsprechend schneiden — verglichen mit dem Fall ohne private Nachfrage (siehe Abbildung 5.8a) — noch mehr Flottenkombinationen besser als der Referenzfall ab.



(a) Auslegung optimiert auf den Fall ohne private Nachfrage

(b) Auslegung optimiert auf den Fall privater Nachfrage

Abbildung 5.9.: Jährliche Verluste des HRS-Betriebs für Flottenkombinationen aus Taxis und Carsharing-PKW (CS-PKW) im Falle privater Nachfrage

In Abbildung 5.9b ist dargestellt, wie die Verluste im Falle privater Nachfrage ausfallen, wenn die Auslegung für diesen Fall optimiert wird. Hier ist unter anderem die WEA-Leistung dem gestiegenen Wasserstoffbedarf angepasst, sodass die Verluste gegenüber dem in Abbildung 5.9a dargestellten Fall sinken. Auch gegenüber dem Fall ohne private Nachfrage sinken die Verluste bis auf wenige Ausnahmen für alle Flottenkombinationen, da die HRS nun besser ausgelastet ist. Insbesondere profitiert der Referenzfall (144 900 € Verlust pro Jahr), sodass nur die Fälle S10-T0-B0, S20-T0-B0 und S0-T10-B0 diesem überlegen sind, wie die Einfärbung in der Abbildung zeigt.

### 5.2.3. Sensitivitätsanalyse

Für die gezeigte Untersuchung wurden verschiedene Annahmen getroffen. Im Folgenden werden ausgewählte Parameter nun verändert, um ihren Einfluss auf die Ergebnisse zu bewerten. Es wird untersucht, welche Auswirkungen ein Strombezug ohne WEA, ein Anstieg des Wasserstoffverkaufspreises, sinkende Komponentenkosten und eine geringere Überdimensionierung auf die jährlichen Verluste der HRS haben. Der Einfluss einer zusätzlichen Berücksichtigung von Fahrzeug-Mehrkosten, der Einfluss geringerer Volllaststunden der Windenergieanlagen sowie der Einfluss der Verlegung eines Erdkabels werden in Anhang D gezeigt.

#### Einfluss der Strombezugsoption

Alle bislang gezeigten Auslegungen basieren auf einer HRS mit per Direktleitung angeschlossenen WEA in räumlicher Nähe. In der Praxis wird eine solche Konfiguration nicht an jedem relevanten Standort möglich sein. Alternativ kann die HRS ausschließlich mit Strom versorgt werden, der am Spotmarkt beschafft wird. In diesem Fall steigen die LCOH<sub>2</sub>, wie in Abbildung 5.10 gezeigt wird. Die opak dargestellte Fläche zeigt die LCOH<sub>2</sub> bei reinem Spotmarktbezug. Durch den Wegfall der Möglichkeit, Strom aus einer WEA zu beziehen, steigen die Verluste für alle Flottenkombinationen. Sie bleiben identisch für den Referenzfall ohne Flotten. Sämtliche Flottenkombinationen führen zudem zu höheren Verlusten als im Referenzfall. Beispielsweise steigen die jährlichen Verluste im Fall S200-T0-B0 von 156 300 € auf 299 100 €, also um 91 % an.

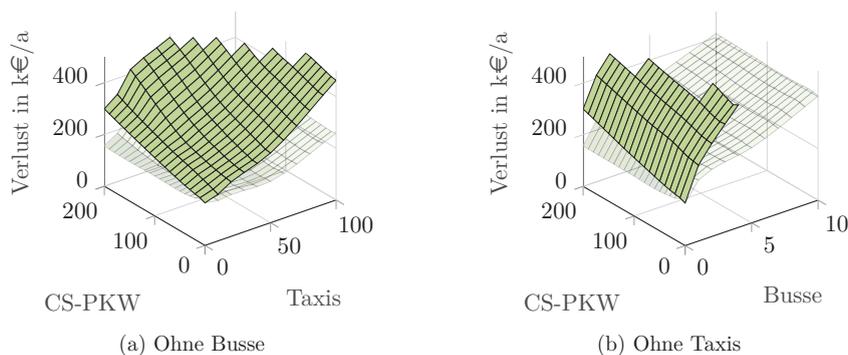


Abbildung 5.10.: Netto-H<sub>2</sub>-Gestehungskosten (LCOH<sub>2</sub>) für verschiedene Flottenkombinationen aus Carsharing-PKW (CS-PKW), Taxis und Bussen. Die opaken Flächen zeigen Ergebnisse für den Fall, dass keine Windenergieanlagen zur Verfügung stehen

### Einfluss der Überdimensionierung

Allen bisher diskutierten Flottenkombinationen liegt die Randbedingung zugrunde, dass auch private PKW versorgt werden können müssen. Dabei wird ein Bedarf entsprechend der HRS-Klasse „Very small“ gewählt. Dies führt zu einer Überdimensionierung der HRS bezogen auf die angenommene, tatsächliche Wasserstoffnachfrage durch Flotten. Lockert man diese Anforderung, so werden geringere Verluste erwartet. In Abbildung 5.11 sind jährliche Verluste für den Fall dargestellt, dass nur ein Viertel des bisher angenommenen privaten Wasserstoffbedarfs zusätzlich zum Bedarf der Flotte gedeckt werden können muss. Für Flottenkombinationen mit Bussen wird nun zudem angenommen, dass keine eigenen Mitteldruckverdichter erforderlich sind und stattdessen Hochdruckverdichter gleichermaßen für PKW und Busse verwendet werden. Beide Maßnahmen bedingen eine Verringerung der Verluste. Zu Vergleichszwecken ist der Basisfall mit bisheriger Überdimensionierung transparent dargestellt. Insbesondere Flottenkombinationen mit Bussen profitieren. So sinken beispielsweise die jährlichen Verluste im Fall S200-T0-B5 von 318 500 € um 18 % auf 261 300 € (siehe Abbildung 5.11b). Im Fall nur eines Busses sinken die jährlichen Verluste auf 169 000 € und liegen damit nur noch etwa 4300 € über dem Referenzfall. Für den Fall von reinen PKW-Flotten ergibt sich ein differenzierteres Bild. Für kleine Flotten sind die Vorteile zunächst gering, da eine Mindestgröße einiger Komponenten nicht unterschritten werden darf und so die Überdimensionierung kaum geringer ausfällt als im Basisfall. Werden die Flotten größer, so sinken die Verluste, zum Beispiel im Fall S100-T0-B0 von 154 100 € um 11 % auf 137 500 € (siehe Abbildung 5.11a). Die Vorteile verringern sich, wenn die Flotten noch größer werden, da die Auswirkungen einer geringeren Überdimensionierung weniger stark ins Gewicht fallen. Zusätzlich gibt es den Effekt einer deutlichen Reduktion der Verluste im Fall S200-T20-B0, der mit den ungewöhnlich hohen Verlusten im Referenzfall zu erklären ist (vergleiche Abbildungen 5.4b und 5.8a).

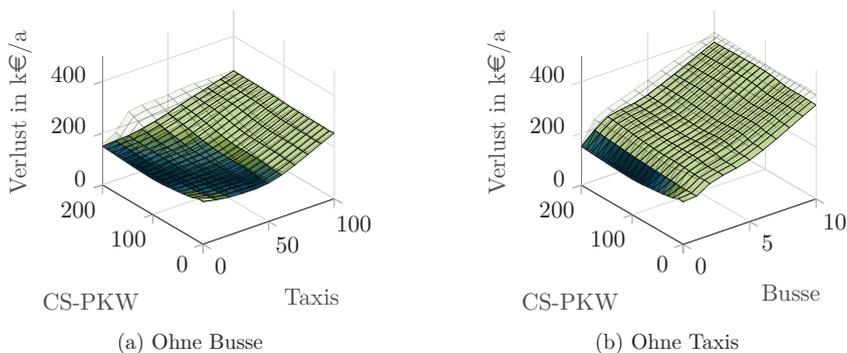


Abbildung 5.11.: Jährliche Verluste des HRS-Betriebs bei geringerer Überdimensionierung

### **Einfluss des Verkaufspreises von Wasserstoff**

Für die untersuchten Flotten und Randbedingungen kann kein wirtschaftlicher Betrieb erreicht werden, da die LCOH<sub>2</sub> den Verkaufspreis (netto) von Wasserstoff übersteigen. Um Wirtschaftlichkeit zu erreichen, müssen folglich entweder die LCOH<sub>2</sub> gesenkt werden oder der Verkaufspreis muss erhöht werden. Im Folgenden wird der Einfluss des Verkaufspreises auf die jährlichen Verluste des Tankstellenbetriebs untersucht. Dazu zeigt Abbildung 5.12 vergleichend Ergebnisse für verschiedene Netto-Verkaufspreise im Fall fehlender privater Nachfrage. Während die hellste Einfärbung nach wie vor die Verluste des Referenzfalls markiert, zeigt der dunkelste Farbton nun den Punkt ohne Verluste an. Der Referenzfall ist von einer Änderung des Verkaufspreises unbeeinflusst, da keine Nachfrage besteht und folglich auch kein Wasserstoff verkauft wird. Mit einer Erhöhung des Verkaufspreises verschiebt sich die Flottenzusammensetzung, die zu den geringsten Verlusten führt, hin zu größeren Flotten. Kombinationen aus etwa 40 bis 70 Taxis und 10 Bussen erreichen die Wirtschaftlichkeit bei einem Verkaufspreis von  $10,50 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  (siehe Abbildung 5.12d). Es ist für einen wirtschaftlichen Betrieb also entweder eine Steigerung des Verkaufspreises um 32 %, eine entsprechende Senkung der LCOH<sub>2</sub> oder eine Kombination erforderlich. Flotten mit 40 bis 100 Taxis und mindestens 6 Bussen ermöglichen einen wirtschaftlichen Betrieb bei einem Verkaufspreis von mindestens  $10,75 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  (siehe Abbildung 5.12e). Reine Busflotten sind erst ab  $11,00 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  und einer Flottengröße von mindestens 10 Fahrzeugen wirtschaftlich zu versorgen (siehe Abbildung 5.12f).

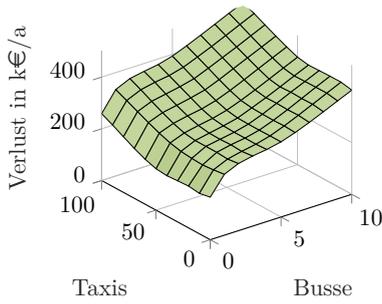
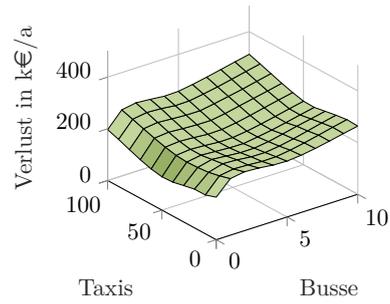
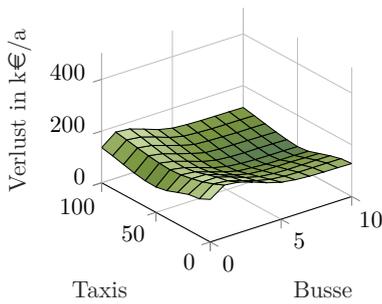
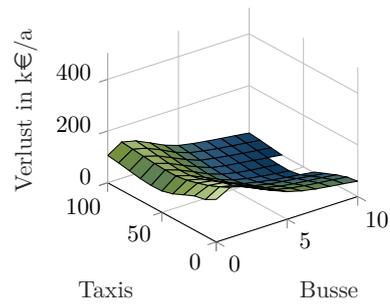
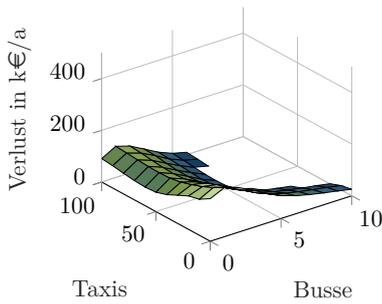
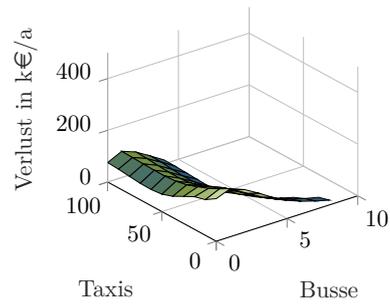
(a) H<sub>2</sub>-Preis: 7,98  $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$ (b) H<sub>2</sub>-Preis: 9,00  $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$ (c) H<sub>2</sub>-Preis: 10,00  $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$ (d) H<sub>2</sub>-Preis: 10,50  $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$ (e) H<sub>2</sub>-Preis: 10,75  $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$ (f) H<sub>2</sub>-Preis: 11,00  $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$ 

Abbildung 5.12.: Jährliche Verluste des HRS-Betriebs für verschiedene Flottenkombinationen aus Taxis und Bussen ohne private Nachfrage für verschiedene H<sub>2</sub>-Verkaufspreise (netto). Ausgeblendete Kombinationen erreichen die Wirtschaftlichkeit

### Einfluss der Komponentenkosten und der Stromnebenkosten

Eine Senkung der LCOH<sub>2</sub> kann zukünftig durch sinkende Kosten der Tankstelle erfolgen. Eine weitere Möglichkeit zur Kostensenkung besteht in der vollständigen Befreiung von der EEG-Umlage auf Windstrom. Die Auswirkungen können quantifiziert werden, indem die zuvor mittels Optimierung bestimmten Auslegungen mit veränderten Kostenparametern für eine Wirtschaftlichkeitsberechnung herangezogen werden. Abbildung 5.13 zeigt die Sensitivität der Wirtschaftlichkeit gegenüber einer Reduktion der fixen Betriebs- und Kapitalkosten ausgewählter Komponenten um jeweils 20 % sowie gegenüber einem Entfall der EEG-Umlage auf Windstrom. Eine komponentenweise Darstellung findet sich im Anhang D. Variable Betriebskosten werden nicht variiert. Die Auswahl der Komponenten umfasst den Elektrolyseur, die Verdichter, die Druckspeicher sowie die Zapfsäule und die Vorkühlung. Die WEA werden nicht untersucht, da davon ausgegangen wird, dass es sich um eine reife Technologie handelt, die in der nahen Zukunft voraussichtlich keine weiteren wesentlichen Kostenreduktionen erfährt<sup>3</sup>. Die Referenzwerte sind transparent dargestellt.

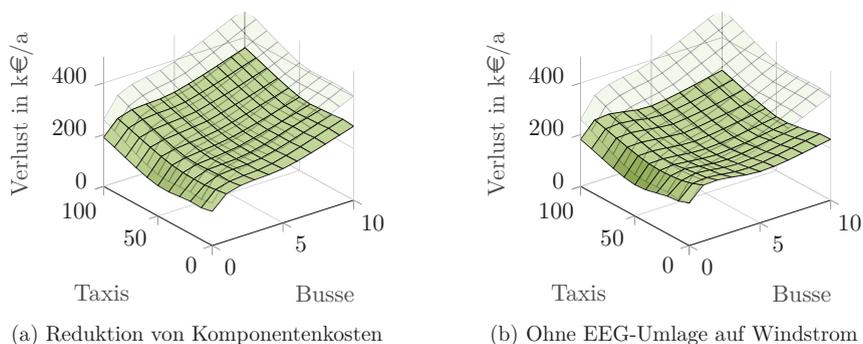


Abbildung 5.13.: Sensitivität der jährlichen Verluste des HRS-Betriebs gegenüber einer Reduktion der Komponentenkosten um 20 % beziehungsweise ohne EEG-Umlage auf Windstrom. Die Referenzwerte sind transparent dargestellt

Werden die Komponentenkosten reduziert (siehe Abbildung 5.13a), so verringern sich die Verluste beispielsweise im Fall S0-T100-B10 um 30 %, im Fall S0-T0-B10 um 29 % und im Fall S0-T100-B0 um 27 %. Die Auswirkungen eines Entfalls der EEG-Umlage auf Windstrom sind in Abbildung 5.13b gezeigt. Diese beträgt andernfalls 40 % der regulären EEG-Umlage. Im Fall S0-T100-B10 sinken die Verluste um 47 % und in den Fällen S0-T0-B10 und S0-T100-B0 um 42 % und 30 %. Tatsächlich können die Verluste sowohl im Falle reduzierter Komponentenkosten als auch bei einem Entfall

<sup>3</sup>Diese Annahme fußt auf Daten aus [151], die zwischen 2012 und 2015 eine Kostensenkung der Hauptinvestitionskosten von unter 2 % pro Jahr bei unveränderten oder leicht gestiegenen Investitionsnebenkosten zeigen.

der EEG-Umlage auf Windstrom noch weiter sinken, weil sich gegebenenfalls andere Auslegungsoptima ergeben. Würde beispielsweise Elektrolyse bedeutend günstiger, dann kann es vorteilhaft sein, eine etwas höhere Elektrolyseleistung vorzusehen, um noch mehr günstigen WEA-Strom beziehen zu können.

### Parameterkombinationen, die Wirtschaftlichkeit erreichen

Bislang wurden verschiedene Einflüsse separat dargestellt. Im Folgenden werden nun ausgewählte Einflussgrößen so kombiniert, dass ein wirtschaftlicher Betrieb bei mindestens einer der betrachteten Flottenkombinationen möglich wird. Es werden der Wasserstoffverkaufspreis (Variation in Schritten von  $0,50 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ ), die prozentuale Reduktion der Komponentenkosten (Variation in Schritten von 5 %) und ein möglicher Entfall der EEG-Umlage auf Windstrom betrachtet. Es werden nicht alle denkbaren Kombinationen gezeigt, sondern die Kombinationen ausgewählt, die gerade einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen. Dabei wird zunächst je einer der drei Parameter unverändert gelassen.

Wird die EEG-Umlage auf Windstrom nicht erlassen (siehe Abbildung 5.14), so muss bei einer Kostenreduktion der Komponenten um 25 % der Wasserstoffverkaufspreis auf  $9,50 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  erhöht werden. Das entspricht einer Erhöhung um 19 %. Diese Anpassung reicht gerade für einen wirtschaftlichen HRS-Betrieb im Falle einer Flottenkombinationen aus 10 Bussen und etwa 50 Taxis (siehe Abbildung 5.14a). Ist hingegen nur eine Kostenreduktion um 15 % möglich, so muss der Verkaufspreis auf  $10 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ , also um 25 % erhöht werden. In diesem Fall führen mehrere der betrachteten Flottenkombinationen mit 7 bis 10 Bussen und 40 bis 100 Taxis zu einem wirtschaftlichen HRS-Betrieb (siehe Abbildung 5.14b).

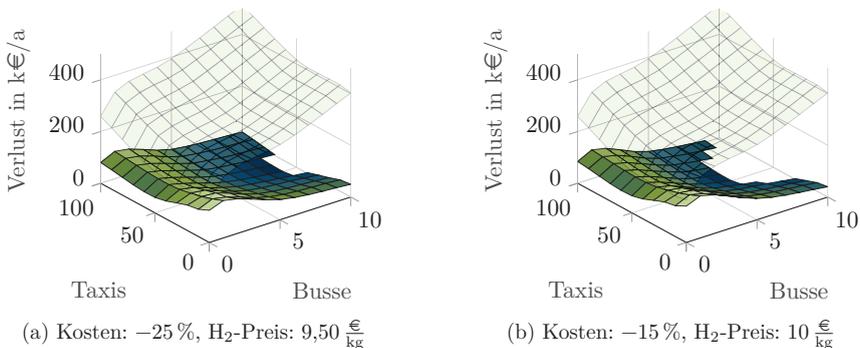


Abbildung 5.14.: Sensitivität der jährlichen Verluste des HRS-Betriebs gegenüber einer gleichzeitigen Variation von Komponentenkosten und  $\text{H}_2$ -Preis. Die Referenzwerte sind transparent dargestellt

## 5. Auslegung einer H<sub>2</sub>-Initialzelle

Parametervariationen, die einen Entfall der EEG-Umlage auf Windstrom beinhalten, sind in Abbildung 5.15 dargestellt. Soll in diesem Fall der Verkaufspreis konstant bleiben, so ist eine Reduktion der Komponentenkosten um 35 % erforderlich. Wirtschaftlichkeit wird dann für die meisten Flottenkombinationen mit mindestens 5 Bussen erreicht (siehe Abbildung 5.15a). Kann hingegen keine Kostenreduktion der Komponenten erreicht werden (siehe Abbildung 5.15b), so ist eine Erhöhung des Verkaufspreises auf  $9,50 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  nötig. In der Folge erreichen nahezu alle Flottenkombinationen mit mindestens 5 Bussen und 40 Taxis die Wirtschaftlichkeit.

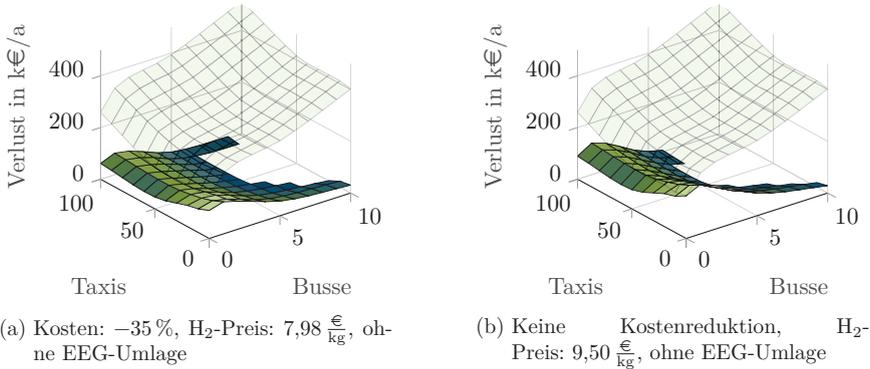


Abbildung 5.15.: Sensitivität der jährlichen Verluste des HRS-Betriebs gegenüber einer Variation von zwei Parametern. Die Referenzwerte sind transparent dargestellt

Abbildung 5.16 zeigt den Einfluss einer gleichzeitigen Variation aller drei Parameter auf die Wirtschaftlichkeit. In diesem Fall muss jeder einzelne Parameter weniger stark verändert werden, um einen wirtschaftlichen HRS-Betrieb zu ermöglichen. Können die Komponentenkosten um 20 % reduziert werden, genügt eine Erhöhung des Verkaufspreises auf  $8,50 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ , wenn gleichzeitig die EEG-Umlage auf Windstrom entfällt. Dann ermöglichen Flotten mit 8 oder mehr Bussen und etwa 50 Taxis einen wirtschaftlichen HRS-Betrieb (siehe Abbildung 5.16a). Die wirtschaftlichste Flottenkombination besteht aus 10 Bussen und 50 Taxis und führt zu einem jährlichen Gewinn aus dem Betrieb der HRS von 11 000 €. Gelingt nur eine Reduktion der Komponentenkosten von 10 %, ist neben einem Entfall der EEG-Umlage eine Erhöhung des Verkaufspreises auf  $9 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  erforderlich. In der Folge wird unter anderem für Flotten mit mindestens 7 Bussen und über 40 Taxis ein wirtschaftlicher Betrieb erreicht (siehe Abbildung 5.16b). Der höchste jährliche Gewinn beträgt 28 000 € und kann erreicht werden, wenn 10 Busse und 50 Taxis versorgt werden.

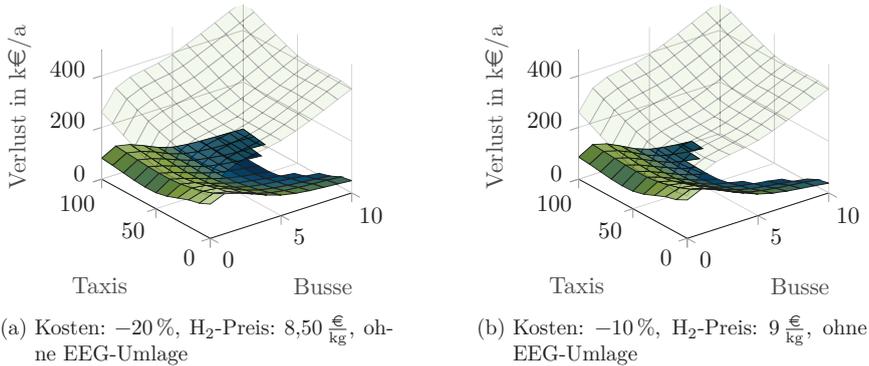


Abbildung 5.16.: Sensitivität der jährlichen Verluste des HRS-Betriebs gegenüber einer Variation von drei Parametern. Die Referenzwerte sind transparent dargestellt

### 5.3. Zusammenfassung von Kapitel 5 und Literaturabgleich

In diesem Kapitel wurde eine Methodik zur Auslegung einer  $H_2$ -Initialzelle vorgestellt und angewendet. Eine  $H_2$ -Initialzelle kann verstanden werden als eine HRS mit angeschlossener WEA und Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse. Die Auslegung erfolgte auf Basis der in Kapitel 4 erzeugten Nachfragezeitreihen für verschiedene Flottengrößen und lieferte Wasserstoffgestehungskosten sowie eine Quantifizierung der Wirtschaftlichkeit eines HRS-Betriebs für jede Flottenkombination. Diese Ergebnisse sind Grundlage für die Auslegung eines HRS-Netzwerks in Kapitel 6. Im Folgenden werden die Methodik und die Ergebnisse zusammengefasst, gefolgt von einem Literaturabgleich.

#### Zusammenfassung der Methodik

Es wurde ein Genetischer Optimierungsalgorithmus erläutert, mit dem sich HRS-Konfigurationen schrittweise einem Optimum annähern lassen. Dazu wurde er auf ein Simulationsmodell einer HRS angewendet, das beliebige Konfigurationen simulieren und bewerten kann. Es beinhaltet folgende Komponentenmodelle: WEA, Strom-Spotmarkt, Elektrolyseur, NDS, MDS, HDS, Hoch- und Mitteldruckverdichter, Zapfsäule, Vorkühlung und Wasserstoffnachfrage. Es wurden zwei Optimierungsziele definiert: Geringe LCOH<sub>2</sub> im Falle ausbleibender privater Nachfrage und geringe LCOH<sub>2</sub> im Fall, dass private Nachfrage auftritt. Die Entscheidungsvariablen der Optimierung sind die Leistung der WEA, die Leistung des Elektrolyseurs, Speicherkapazitäten und Verdichteranzahl (Mitteldruck). Die Anzahl der Hochdruckverdichter kann direkt bestimmt werden und war nicht Gegenstand der Optimierung. Die Optimierung erfolgte für 150 Flottenkombinationen aus Carsharing-Fahrzeugen, Taxis und Bussen.

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Für jede Flottenkombination wurde eine Pareto-Front aus verschiedenen, idealen Systemkonfigurationen mittels Optimierung bestimmt. Jede dieser Konfigurationen stellt einen anders ausgeprägten Kompromiss zwischen den beiden Optimierungszielen dar. Die weitere Betrachtung erfolgte beschränkt auf das Ziel möglichst geringer LCOH<sub>2</sub> für den Fall ohne private Nachfrage, da in der gegenwärtigen Phase des Infrastrukturaufbaus von keiner oder sehr geringer privater Nachfrage auszugehen ist. Jede der betrachteten Konfigurationen ist wegen der gesetzten Randbedingungen in der Lage, später aufkommende private Nachfrage zusätzlich zu versorgen. Die Wirtschaftlichkeit der Systemauslegungen wurde in Kapitel 5.2.2 anhand der jährlichen Verluste des HRS-Betriebs diskutiert. Im Referenzfall ohne Flotten betragen diese 164 700 €. Einige, aber nicht alle Fälle mit Flotten können die jährlichen Verluste verringern. Dies sind insbesondere Kombinationen mit kleinen bis großen Carsharing- und kleinen bis mittleren Taxiflotten. Die geringsten Verluste betragen  $151\,700 \frac{\text{€}}{\text{a}}$  für eine Flotte aus 60 Carsharing-PKW. Busflotten können die Verluste unter den gewählten Annahmen nicht reduzieren. Auch für den Fall später aufkommender privater Nachfrage sind viele der Flottenkombinationen vorteilhaft gegenüber dem Referenzfall.

Die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Konfigurationen wird in Kapitel 6 zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit eines HRS-Netzwerks weiterverwendet, sodass sie ein wichtiges Zwischenergebnis darstellt. Deshalb wurde die Sensitivität der Wirtschaftlichkeit des HRS-Betriebs gegenüber verschiedenen Parametern untersucht. Sollte die Integration einer WEA nicht möglich sein und die Stromversorgung vollständig aus dem Stromnetz der öffentlichen Versorgung erfolgen, so steigen die Verluste für alle Flottenkombinationen. Auch der Verkaufspreis von Wasserstoff hat einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. So können HRS für Flotten aus 10 Bussen und etwa 50 Taxis wirtschaftlich betrieben werden, wenn der Verkaufspreis auf  $10,50 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  steigt. Ab  $10,75 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  sind nahezu alle Fälle mit mindestens 5 Bussen und 30 Taxis wirtschaftlich. Die Sensitivität gegenüber einer Reduktion der Komponentenkosten um 20 % beträgt bis zu 30 %. Einen erheblichen Einfluss hat zudem die EEG-Umlage auf Windstrom. Gemäß den Annahmen beträgt sie ohnehin nur 40 % des regulären Satzes, da davon ausgegangen wird, dass sich die WEA in räumlicher Nähe zur HRS befindet. Entfällt sie jedoch ganz, so sinken die Verluste in den betrachteten Fällen um 30 % bis 47 %. Ein wirtschaftlicher Betrieb kann mit einer geringen Anpassung des Verkaufspreises erreicht werden, wenn mehrere Maßnahmen kombiniert werden. Entfällt beispielsweise die EEG-Umlage auf Windstrom für Elektrolyse und gelingt eine Reduktion der Komponentenkosten um 20 %, dann genügt eine Erhöhung des Verkaufspreises von Wasserstoff um 7 % auf  $8,50 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ . In diesem Fall ermöglichen mehrere Flottenkombinationen aus Bussen und PKW einen wirtschaftlichen HRS-Betrieb. Eine HRS zur Versorgung von 10 Bussen und 50 Taxis würde beispielsweise einen jährlichen Gewinn von 11 000 € erreichen.

In den untersuchten Fällen und unter den getroffenen Randbedingungen sind Carsharing- und Taxiflotten vorteilhaft gegenüber dem Referenzfall ohne Flotten, während

Busse (und größere PKW-Flotten) keine Reduktion der Verluste bewirken. Die Sensitivitätsanalyse hat jedoch gezeigt, dass insbesondere kombinierte Flotten aus Bussen und Taxis vorteilhaft sind, wenn die Strombezugskosten reduziert oder der Wasserstoffverkaufspreis erhöht wird. Eine entsprechende Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen kann demnach eine große Wirkung und somit Bedeutung für den Erfolg von Wasserstoff als Kraftstoff haben.

#### Literaturabgleich

Die in dieser Arbeit verwendeten Kostenparameter der HRS-Komponenten basieren auf einer Literatur- und Datenrecherche (siehe Anhang B). Wesentlichen Einfluss auf die Gesamtkosten und Wirtschaftlichkeit haben zudem die Rahmenbedingungen des Strombezugs. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass Elektrolyseure elektrische Energie von WEA beziehen. Dazu wird ein Stromerzeugungsprofil einer WEA hinterlegt, das 2700 Volllaststunden pro Jahr aufweist und je nach Erfordernis skaliert werden kann. Nun soll eingeschätzt werden, ob dieser Wert optimistisch oder konservativ ist. Zum Vergleich wird Jentsch (2014) [152] herangezogen. Hier werden für Onshore-WEA zwischen 2100 und 2599 Volllaststunden pro Jahr ausgewiesen. Der höhere Wert wird von Robinius (2015) [52] aufgegriffen. Burkhardt et al. (2016) [153] gehen für Onshore-WEA von 2500 Volllaststunden pro Jahr aus. Vor diesem Hintergrund erscheint das verwendete Erzeugungsprofil überdurchschnittlich gut und diese Annahme somit optimistisch. Werden allerdings nicht Annahmen und Daten zum Bestand an WEA in Deutschland, sondern neu errichtete Anlagen herangezogen, so ändert sich diese Einschätzung. Während im Jahr 2017 der Bestand an Onshore-WEA Volllaststunden in Höhe von 1760 aufwies, wurden für im Jahr 2017 neu errichtete Anlagen 2740 Volllaststunden erwartet [150]. Das verwendete Erzeugungsprofil kann deshalb als realistisch für neu zu errichtende WEA angesehen werden.

Auf Basis der erwähnten Kostenparameter erfolgte eine Auslegung von HRS für verschiedene Flottengrößen und eine private Nachfrage entsprechend der HRS-Klasse „Very small“. In der Literatur finden sich keine Angaben zur Wirtschaftlichkeit einer HRS mit Onsite-Elektrolyse für verschiedene Flottenkombinationen, es kann aber ein Vergleich auf Basis des Referenzfalls ohne Flotten erfolgen. Es können nur Angaben für HRS mit Onsite-Elektrolyse und die aktuelle Situation verglichen werden. Untersuchungen, die zukünftige Kostenreduktionen annehmen, können nicht für einen Vergleich verwendet werden. Die ausgewiesenen jährlichen Verluste des Referenzfalls dieser Arbeit können zum Vergleich mit Annuitäten anderer Arbeiten herangezogen werden, da in diesem Fall zwar eine HRS-Kapazität zur Deckung eines Wasserstoffbedarfs der Klasse „Very small“ vorgesehen ist, aber keine tatsächliche Nachfrage angenommen wird. Die Verluste sind somit äquivalent mit der Annuität aus Capex und  $\text{Opex}_{\text{fix}}$ . In Brey et al. (2014) [61] werden Capex für verschiedene HRS-Konfigurationen genannt. Die Untersuchung liegt vier Jahre zurück und kann damit als aktuell genug angesehen werden. Es werden Capex für eine abzugebende Wasserstoffmasse von  $34 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$  und  $324 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$  angegeben. Mittels linearer Interpolation las-

## 5. Auslegung einer $H_2$ -Initialzelle

sen sich Capex für eine HRS der Klasse „Very small“ mit  $56 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$  ableiten. Es ergeben sich etwa 1,82 Mio. €, die sich unter Annahme eines Zinssatzes von 5 % und einer Nutzungsdauer von 20 Jahren in eine Annuität von 150 400 € umrechnen lassen. Werden zur Berücksichtigung von  $\text{Opex}_{\text{fix}}$  3 % der Annuität angesetzt, ergeben sich insgesamt 154 900 €. In dieser Arbeit werden für einen vergleichbaren Fall jährliche Verluste in Höhe von 164 700 €, also 6,3 % mehr ausgewiesen. Dieser Unterschied ist in Anbetracht der für diesen Vergleich angewendeten Interpolation nicht signifikant.

## 6. Auslegung eines H<sub>2</sub>-Initialnetzwerks

Gegenwärtig errichtete Wasserstofftankstellen sind kaum ausgelastet, da bislang nur wenige Menschen ein FCEV fahren. In Kapitel 5 wurde gezeigt, dass Bus-, Taxi- und Carsharing-Flotten bei einer Umstellung auf FCEV geeignet sein können, die Wirtschaftlichkeit von Wasserstofftankstellen zu verbessern. In diesem Kapitel wird nun mittels eines Optimierungsverfahrens untersucht, wie und wo innerhalb eines Betrachtungsgebiets eine Kombination von Flotten und HRS sinnvoll eingesetzt werden kann. Dabei fließen sowohl die in Kapitel 5 für verschiedene Flottenkombinationen ermittelte Wirtschaftlichkeit von HRS als auch die in Kapitel 4 bestimmten Anforderungen der Flotten an Tankinfrastruktur ein (siehe Abbildung 6.1). Mit der Optimierung werden zwei Ziele verfolgt: Erstens sollen Aufbau und Betrieb der Infrastruktur möglichst wirtschaftlich und zweitens soll der Nutzen des entstehenden HRS-Netztes für private Fahrzeugbetreiber in Deutschland möglichst hoch sein. Diese Ziele sind im Allgemeinen nicht gleichzeitig vollumfänglich erreichbar, weshalb geeignete Kompromisse identifiziert werden müssen. Ergebnis der Optimierung sind folglich die Gestalt des generierten HRS-Netzwerks sowie dessen Nutzen und Kosten.

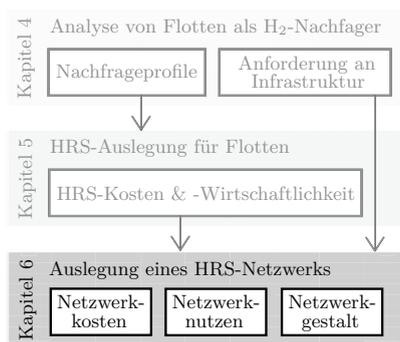


Abbildung 6.1.: Verknüpfung des Kapitels 6 mit den übrigen Kapiteln

In Kapitel 6.1 wird die Methodik erläutert, mit der diese Optimierung vorbereitet und durchgeführt wird. Dazu gehört auch ein Verfahren zur Bewertung des Nutzens eines HRS-Netzwerks für private Fahrer. Die Methodik wird auf verschiedene Szenarien angewendet, die in Kapitel 6.2 beschrieben werden. Im Anschluss werden in Kapitel 6.3 Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

## 6.1. Methodik

In den Städten eines Betrachtungsgebiets sollen nun Carsharing-, Taxi- und Busflotten sowie die dazu passende Tankinfrastruktur mittels Optimierung ausgelegt werden. Ziele der Optimierung sind dabei, eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit des Netzwerks und einen möglichst hohen Nutzen für private Fahrzeugbetreiber zu erreichen. Als Maß für den Nutzen wird die Anzahl der Personen herangezogen, für die das Netzwerk einen Umstieg auf FCEV ermöglicht. Es wird angenommen, dass für einen Umstieg einerseits eine HRS in der Nähe des jeweiligen Wohnorts erforderlich ist und andererseits ein Mindestanteil der Fahrten in andere Städte möglich sein muss (siehe Kapitel 6.1.2). Die Anforderungen beziehen sich dabei auf die Verfügbarkeit von HRS und nicht auf deren Kapazität. Da die Ergebnisse aus Kapitel 5 für keine der untersuchten Flottenkombinationen eine positive Wirtschaftlichkeit ausweisen, ist das erste Optimierungsziel äquivalent mit der Minimierung der jährlichen Verluste, die durch Aufbau und Betrieb der HRS entstehen. Die Optimierungsziele sind dabei im Allgemeinen nicht gleichzeitig vollumfänglich erreichbar. Sieht man beispielsweise viele HRS vor, dann können zwar viele Einwohner versorgt werden, es ergeben sich jedoch auch vergleichsweise hohe Verluste. Es ist zu erwarten, dass es verschieden ausgeprägte Kompromisse zwischen diesen beiden Zielen gibt. Für die Optimierung wird der bereits in Kapitel 5 eingesetzte und in Kapitel 3.5.2 beschriebene Genetische Algorithmus eingesetzt. Dieser bildet derartige Kompromisse in den Ergebnissen ab, da er die gleichberechtigte Berücksichtigung mehrerer Optimierungsziele erlaubt. In Abbildung 6.2 ist schematisch ein mögliches Ergebnis im Hinblick auf die beiden Optimierungsziele gezeigt. Die besten Kompromisse bilden die Pareto-Front (blau hervorgehoben). Jeder der möglichen Lösungen (als Punkt in der Abbildung dargestellt) liegt eine Konfiguration aus Flottengrößen und Tankstellenanzahl sowie -positionen für jede Stadt des Betrachtungsgebiets zugrunde.

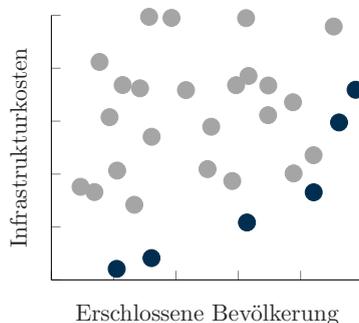


Abbildung 6.2.: Beispielhaftes Optimierungsergebnis mit Pareto-Front (blau)

Die Entscheidungsvariablen dieser Optimierung sind für jede Stadt die Größen der drei Flotten sowie die Anzahl und Positionen der HRS. Zusätzlich bestehen Nebenbe-

dingungen. So muss, falls für eine Stadt eine Carsharing-Flotte vorgesehen wird, den infrastrukturellen Anforderungen dieser Flotte entsprochen werden. In Kapitel 4.4 wurde definiert, dass mindestens 50 % der Bevölkerung im Einzugsgebiet einer HRS leben müssen, damit Carsharing auf Basis von Wasserstoff als Kraftstoff möglich ist. Eine entsprechende Nebenbedingung besteht auch für Taxiflotten. So müssen mindestens 50 % der Taxistände in höchstens 10 Minuten Entfernung zu einer HRS gelegen sein (siehe Kapitel 4.3). Der Betrieb von Bussen hingegen erfordert, dass mindestens eine HRS in höchstens 10 Minuten Entfernung zu einem Busbetriebshof gelegen sein muss (siehe Kapitel 4.2).

Die Zielgrößen zu minimieren beziehungsweise zu maximieren sowie die Nebenbedingungen einzuhalten, ist in Anbetracht der hohen Anzahl und feinen Granularität der Entscheidungsvariablen komplex, das heißt, der Suchraum der Optimierung ist sehr groß. Dementsprechend muss die Optimierung mit einer großen Population und einer hohen Generationsanzahl durchgeführt werden. Dies führt zu einem vergleichsweise hohen Berechnungs- und somit Zeitaufwand von voraussichtlich vielen Tagen. Selbst wenn diese Zeit aufgewendet wird, besteht wegen des großen und zerklüfteten Suchraums die Gefahr, dass nur lokale und nicht die globalen Optima gefunden werden. Diese Probleme werden dadurch verschärft, dass die Positionierung der Tankstellen auch darüber entscheidet, ob Verbindungen zwischen einem Landkreis und anderen Landkreisen möglich werden. Gegebenenfalls kann es erforderlich sein, dass HRS in mehreren Landkreisen gleichzeitig an bestimmten Stellen positioniert sind, um eine Verbindung zu ermöglichen. Die Auswirkungen einer Positionsentscheidung sind dabei diskret, das heißt, der Optimierungsalgorithmus kann sich der gewünschten Lösung nicht schrittweise nähern, sondern muss sie direkt, durch gezieltes Probieren finden.

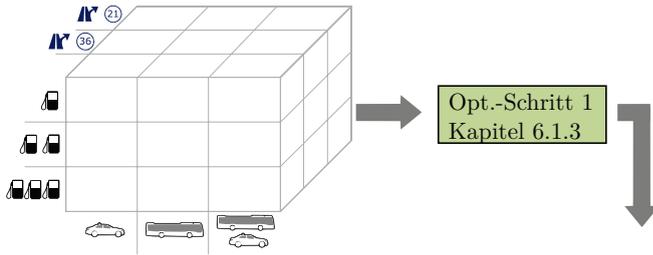
Der verwendete Optimierungsalgorithmus ist für ein so formuliertes, umfassendes Optimierungsproblem daher nur eingeschränkt geeignet und würde einen sehr hohen Berechnungsaufwand erfordern. Dieses Hindernis wird in dieser Arbeit überwunden, indem das Optimierungsproblem in mehrere Teilprobleme zerlegt wird. Diese können nacheinander mittels Optimierung behandelt werden und die Ergebnisse der jeweils vorherigen Optimierungsschritte verwenden. Im ersten Optimierungsschritt (siehe Kapitel 6.1.3) wird jede Stadt einzeln betrachtet. Es werden ideale Positionen für HRS für jede Stadt und jede mögliche Flottenkombination gefunden. Darauf aufbauend werden im zweiten Optimierungsschritt (siehe Kapitel 6.1.4) optimale Flottenkombinationen für jede Stadt identifiziert. Erst im dritten Optimierungsschritt (siehe Kapitel 6.1.5) werden alle Städte gleichzeitig betrachtet. Auf Grundlage der Ergebnisse der ersten beiden Schritte kann dann ein ideales Gesamtnetzwerk aus HRS und Flotten generiert werden.

Das hier anzuwendende Optimierungsverfahren setzt voraus, dass gegebene Konfigurationen aus Tankstellenpositionen und -dimensionierungen sowie Flotten hinsichtlich beider Ziele, hohe Wirtschaftlichkeit und hoher Nutzen für private Nachfrager, bewertet werden können. Die Wirtschaftlichkeit der Infrastruktur lässt sich aus den

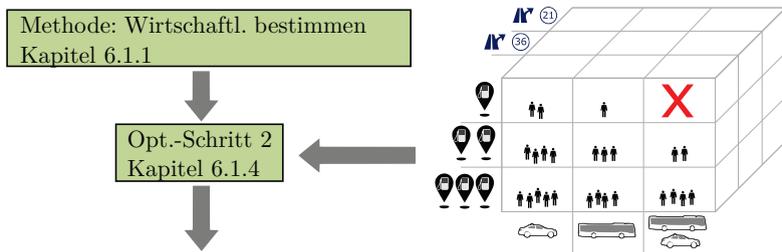
## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

Ergebnissen von Kapitel 5 ableiten, da sie jährliche Verluste für Aufbau und Betrieb einer Tankstelle für jede Kombination der hier betrachteten Flottentypen ausweisen. Um diese Ergebnisse nutzen zu können, müssen für jede HRS eines Landkreises Anzahl und Typ der Fahrzeuge bestimmt werden, die sie versorgen können muss. In Kapitel 6.1.1 wird deshalb die Methodik beschrieben, mit der eine Zuordnung der Flottenfahrzeuge auf mehrere HRS vorgenommen wird. Die Bewertung hinsichtlich des zweiten Ziels erfolgt mittels eines Ansatzes zur Quantifizierung des Nutzens eines HRS-Netzwerks für private Fahrer, der in Kapitel 6.1.2 beschrieben wird. Abbildung 6.3 stellt die einzelnen Elemente der Methodik überblicksartig dar. Das gezeigte Beispiel beschränkt sich auf einen Fall mit nur zwei verschiedenen Flottentypen, drei verschiedenen HRS-Anzahlen und drei verschiedenen Fernstraßenanschlusskombinationen (eine davon ohne Fernstraßenanschluss) sowie drei Städte (zwei davon werden erst im dritten Schritt gezeigt).

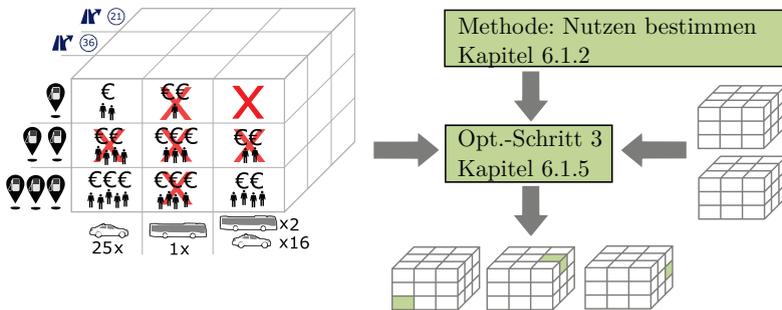
Als Grundlage der geographischen Betrachtungen dient die Einteilung Deutschlands in Landkreise und kreisfreie Städte. Es werden die geographischen Daten des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie verwendet [154]. Dabei wird auf Daten zum Stand 2010 zurückgegriffen, um Kompatibilität mit anderen verwendeten Datenquellen zu gewährleisten. Zusätzlich werden die internationalen Flughäfen in Deutschland in die Liste mit aufgenommen, da sie relevante Fahrtziele sein können. Im Folgenden sind mit dem Begriff Landkreis also zusätzlich kreisfreie Städte und Flughäfen gemeint. Insgesamt werden somit 435 Landkreise betrachtet.



- (a) Optimierungsschritt 1: Wird für jede Kombination aus Flottentypen, HRS-Anzahl und Fernstraßenanschluss je Stadt ausgeführt. HRS-Positionen werden so bestimmt, dass die erfasste Bevölkerung maximiert wird. Wenn Flotten- oder Fernstraßenanforderungen mit der HRS-Anzahl nicht entsprochen werden kann, gibt es keine Lösung



- (b) Optimierungsschritt 2: Fahrzeug- und HRS-Anzahl werden so bestimmt, dass sich gute Kompromisse aus Wirtschaftlichkeit und erfasster Bevölkerung ergeben. Schlechte Varianten werden ausgeschlossen, die verbleibenden bilden die Pareto-Front



- (c) Optimierungsschritt 3: Alle Städte (hier Quader) werden gleichzeitig betrachtet. Für jede Stadt wird genau eine Variante so gewählt, dass sich ein sinnvolles Gesamtnetzwerk (Wirtschaftlichkeit vs. Nutzen) ergibt. Dies wird für verschieden ausgeprägte Kompromisse ausgeführt (hier nicht dargestellt)

Abbildung 6.3.: Schematische Darstellung der Optimierungsmethodik

### 6.1.1. Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit der Infrastruktur

Die Wirtschaftlichkeit einer HRS in Abhängigkeit der zu versorgenden Flottengröße wurde in Kapitel 5 mittels Topologieoptimierung bestimmt. In keinem der betrachteten Fälle konnte ein Gewinn ausgewiesen werden, sodass Aufbau und Betrieb einer HRS für Flotten mit einem jährlichen Verlust einhergehen. Je nachdem, welche Flottenfahrzeuge eingesetzt werden, können die Verluste jedoch reduziert werden. Diese Ergebnisse werden nun genutzt, um für Kombinationen aus HRS und Flotten in einer Stadt die jährlichen Verluste aller HRS zu bestimmen. Dafür ist es erforderlich, jeder HRS die auf sie entfallenden Flottenanteile und die damit verbundene Kraftstoffnachfrage zuzuweisen. Dazu wird jeder Flottentyp getrennt betrachtet.

#### Carsharing-Fahrzeuge

Für jede HRS wird gezählt, wie viele Personen in ihrem Einzugsgebiet leben. Die Anzahl der Personen, die in den Einzugsgebieten mehrerer HRS leben, wird entsprechend zu gleichen Teilen auf diese HRS aufgeteilt. Das Einzugsgebiet wird gemäß Kapitel 4.4 mit 2833 m Radius angenommen. Dann wird die Gesamtzahl der erfassten Personen bestimmt. Jeder Tankstelle werden entsprechend dem von ihr erfassten Anteil an Personen nun Fahrzeuge der jeweiligen Gesamtflotte zugewiesen. Die Aufteilung der Fahrzeuge schließt auch bestehende HRS mit ein. Deren Wirtschaftlichkeit wird jedoch nicht betrachtet.

#### Taxis

Das Vorgehen ist analog zu dem für Carsharing-Fahrzeuge. Allerdings wird hier nicht die Anzahl der erfassten Personen als Kriterium herangezogen, sondern die Anzahl der erfassten Taxistände. Es wird also ermittelt, welcher Anteil der insgesamt erfassten Taxistände auf die jeweilige Tankstelle entfällt und die Flotte entsprechend diesem Anteil zugewiesen. Das Einzugsgebiet einer Tankstelle wird gemäß Kapitel 4.3 mit 2833 m Radius angenommen.

#### Busse

Der Tankstelle, die am nächsten an einem Busdepot liegt, wird die gesamte Busflotte zugewiesen. Tankstellen, die schon zuvor bestanden, werden dabei nicht berücksichtigt, da nicht sichergestellt ist, dass diese kompatibel zu Bussen sind.

Für jede Tankstelle steht dann fest, welche Fahrzeuge sie versorgen können muss. In Kapitel 5 wurden für verschiedene Kombinationen aus Flotten die korrespondierenden Verluste einer HRS bestimmt. Diese bilden nun die Stützstellen einer linearen, dreidimensionalen Interpolation, mit Hilfe derer die jährlichen Verluste einer HRS bestimmt werden können, die die jeweils ermittelte Flottenkombination versorgen kann. Die Interpolation ist dreidimensional, da Kombinationen aus drei verschiedenen Flottentypen betrachtet werden.

### 6.1.2. Methode zur Quantifizierung des Nutzens eines HRS-Netzwerks für private Nachfrager

Für den Nutzen eines HRS-Netzes für private Nachfrager gibt es kein bestehendes, etabliertes Maß. Der Nutzen soll zudem nicht für einen bestimmten Fahrer, sondern allgemein für hypothetische, zukünftige Fahrer von FCEV in Deutschland quantifiziert werden. Die Infrastruktur soll also hinsichtlich der Frage bewertet werden, wie vielen Personen sie den Umstieg auf ein FCEV ermöglicht. Dies wird als gegeben angenommen, wenn der Fahrer das FCEV weitestgehend so nutzen kann, wie er es von seinem konventionellen Fahrzeug gewohnt ist. Im Wesentlichen bedeutet das, dass der Fahrer die gleichen Fahrtziele erreichen können und sein Tankverhalten nicht grundlegend ändern muss. Bestehende Untersuchungen zum Tankverhalten von Fahrern werden in Kapitel 3.4 dargestellt. Fahrer konventioneller Fahrzeuge tanken demnach bevorzugt entweder in der Nähe des Zuhauses oder auf dem Weg zu anderen Fahrtzielen. Zusätzlich ist es auf längeren Strecken in jedem Fall erforderlich, auf dem Weg zu tanken. In der Literatur bestehen darauf aufbauende Verfahren zur optimierten Tankstellenpositionierung (siehe Kapitel 3.4.2 und Kapitel 3.4.3). Diese Verfahren haben ebenfalls zum Ziel, den Nutzen des entstehenden Tankstellennetzwerks für private Fahrer zu maximieren.

Bevorzugtes Tanken in der Nähe des Zuhauses wird demnach von mehreren Ansätzen adressiert (siehe Kapitel 3.4.2). Für diese Arbeit wird der Maximum-Cover-Ansatz als besonders geeignet angesehen. Er weist Tankstellen ein Einzugsgebiet zu und maximiert durch Positionierung von Tankstellen die Anzahl der erfassten Haushalte oder Personen. Demnach wäre der Nutzen der Infrastruktur für private Nachfrager dann besonders hoch, wenn mit den positionierten Tankstellen möglichst viele Personen als erfasst gelten. Zur Berücksichtigung des bevorzugten Tankens auf dem Weg zu anderen Fahrtzielen wird in dieser Arbeit der Flow-Refueling-Ansatz (siehe Kapitel 3.4.3) als besonders geeignet angesehen. Er basiert auf Daten zu Fahrthäufigkeiten zwischen Städten und positioniert Tankstellen so, dass möglichst viele der Fahrten unter Berücksichtigung der Fahrzeugreichweite ermöglicht werden. Je mehr Fahrten möglich werden, desto höher wird der Nutzen der Tankinfrastruktur bewertet.

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass keiner der beiden Ansätze allein zu einem Tankstellennetzwerk führt, das den tatsächlichen Anforderungen der Praxis genügt (siehe Kapitel 3.4). Deshalb werden die beiden Ansätze für diese Arbeit wie folgt kombiniert. Damit ein Einwohner einer Stadt als versorgt gilt, muss mindestens in der Umgebung seines Zuhauses eine HRS verfügbar sein (analog Maximum-Cover-Ansatz). Zusätzliches Erfordernis ist, dass mindestens 75 % seiner Fernfahrten (außerhalb eines Radius' von halber Fahrzeugreichweite) in andere Städte möglich sind (analog Flow-Refueling-Ansatz). Als Kriterium für den Nutzen der Infrastruktur gilt daher die Zahl der Personen, für die beide Bedingungen von der Infrastruktur erfüllt werden. Dieses Vorgehen ähnelt der in [100] präsentierten Abwandlung des Flow-Refueling-Ansatzes (siehe Kapitel 3.4.3). Diese maximiert die Anzahl der

## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

Fahrt-Ursprungsorte, die mehr als beispielsweise 80% der Fahrten absolvieren können. Dabei gehen die Ursprungsorte gewichtet mit der Gesamtzahl der vom jeweiligen Ort ausgehenden Fahrten in die Optimierung ein. Das hier angewendete Vorgehen unterscheidet sich davon hinsichtlich verschiedener Aspekte und wird im Folgenden beschrieben.

Die Landkreise werden nacheinander betrachtet. Im ersten Schritt wird ein Einzugsgebiet von HRS definiert, innerhalb dessen Anwohner als lokal mit Infrastruktur versorgt gelten. Es wird angenommen, dass der Radius dieses Einzugsgebiets 2833 m beträgt, entsprechend 10 Minuten Fahrtzeit bei einer Luftliniengeschwindigkeit von  $17 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  (entnommen aus [126], gilt für motorisierten Individualverkehr). Das Einzugsgebiet wird auf eine geographisch aufgelöste Bevölkerungsverteilung angewendet, die im 100 m mal 100 m-Raster vorliegt (Daten des Zensus 2011 [155]). Die Bevölkerung eines Rasterfelds gilt dann als im Einzugsgebiet einer Tankstelle liegend, wenn der Mittelpunkt des Rasterfelds im Einzugsgebiet liegt.

In einem zweiten Schritt wird geprüft, welche der übrigen Landkreise in Deutschland von dem jeweiligen Landkreis aus erreicht werden können. Als Ursprung und Ziel einer Fahrt werden dabei jeweils die bevölkerungsgewichteten Flächenschwerpunkte der Landkreise verwendet [53]. Es wird angenommen, dass alle Fahrzeuge die gleiche Fahrzeugreichweite von 333,33 km aufweisen und mit vollem Kraftstofftank ihre Fahrt beginnen. Diese Reichweitenannahme liegt unterhalb der nominellen Reichweite aktueller FCEV von etwa 500 km [5], da der Verbrauch bei Überland- und Autobahnfahrten im Allgemeinen ansteigt. So wird für den Toyota Mirai beispielsweise für die Fahrt außerorts ein um etwa 5% höherer Verbrauch ausgewiesen [5]. Für den Fall einer längeren Autobahnfahrt ist mit einer weiteren Verbrauchssteigerung zu rechnen. Die Annahme ist auch darüber hinaus konservativ gewählt, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass innerhalb des Ursprungslandkreises gegebenenfalls noch eine Fahrt von der Tankstelle bis zum gewichteten Flächenschwerpunkt zurückgelegt werden können muss. Diese Fahrt wird nicht modelliert, sondern ihr wird mit einem Reichweitenabschlag entsprochen. Zudem wird berücksichtigt, dass Fahrer typischerweise die volle Reichweite selten ausnutzen und eine Sicherheitsreserve wertschätzen. Es wird ein realistischer Routenverlauf entlang der Bundesautobahnen, Bundesstraßen, Landstraßen und Kreisstraßen verwendet. Dieser basiert auf einem Routenfindungsalgorithmus, der schnellste Verbindungen zwischen zwei Landkreisen entlang des genannten Straßennetzes ermittelt [53]. Für jeden Landkreis müssen 434 Routen in die jeweils übrigen Landkreise betrachtet werden. Dann werden jeder Route die HRS entlang dieser Route zugeordnet, sofern sie höchstens 3 km entfernt sind. Dabei sind zwei Parameter jeder HRS im Folgenden entscheidend: Der Abstand der HRS zur Route (kürzeste Luftlinienverbindung zum Fußpunkt,  $d1_{\text{HRS}}$ ) sowie der Abstand vom Beginn und entlang der Route bis zum Fußpunkt der HRS  $d2_{\text{HRS}}$ . Soll also an einer HRS auf dem Weg getankt werden, so ist vom Beginn der Route die Strecke  $d1_{\text{HRS}} + d2_{\text{HRS}}$  nötig, um bis zur Tankstelle zu gelangen und zusätzlich die Strecke  $d1_{\text{HRS}}$ , um auf die Route zurückzukehren. Alle HRS werden dann in eine Reihenfolge gebracht, indem sie aufsteigend nach  $d2_{\text{HRS}}$  sortiert werden. Als nächstes wird der

Abstand zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Tankstellen HRS1 und HRS2 gebildet:  $d_{\text{HRS1-HRS2}} = d_{2\text{HRS2}} - d_{2\text{HRS1}} + d_{1\text{HRS1}} + d_{1\text{HRS2}}$ . Dabei ist zu beachten, dass auch der Rückweg der Route berücksichtigt werden muss, indem die Strecke zwischen der letzten Tankstelle und dem Ziel verdoppelt und ebenfalls als ein Abstand zwischen zwei Tankstellen betrachtet wird. Unter der Annahme, dass — sofern nötig — jede Tankstelle auf der Route angefahren wird, kann durch Vergleich der zuvor bestimmten Abstände zwischen den Tankstellen mit der Fahrzeugreichweite ermittelt werden, ob das Ziel mit einem FCEV erreicht werden kann. Ist der größte Abstand zwischen zwei Tankstellen kleiner oder gleich der Fahrzeugreichweite, gilt die Route als möglich. Andernfalls ist jedoch noch nicht sicher, dass sie nicht möglich ist, da durch das Anfahren jeder HRS gegebenenfalls ein unnötig langer Weg zurückgelegt wird. Deshalb muss geprüft werden, ob eine andere Wahl anzufahrender Tankstellen die Route ermöglicht. Dazu wird die Auswahl an Tankstellen analog dem Vorgehen in [53] auf nützliche Tankstellen beschränkt. Beispielsweise sind Tankstellen nicht nützlich, wenn es eine andere Tankstelle gibt, die ein kleineres  $d_{2\text{HRS}} + 2 \cdot d_{1\text{HRS}}$  bei einem größeren Wert für  $d_{2\text{HRS}}$  aufweist. Denn diese Tankstelle erfordert weniger zurückzulegende Strecke vom Routenbeginn bis zur Tankstelle und zurück zur Route, während ein Fahrzeug, das diese HRS wählt, nach dem Tankvorgang und der Rückkehr zur Route bereits einen größeren Teil der Route bewältigt hat. Die Berücksichtigung nicht nützlicher Tankstellen kann dazu führen, dass die Route wegen der zusätzlich zurückzulegenden Strecken als nicht möglich erscheint. Deshalb werden nicht nützliche Tankstellen entlang einer Route entfernt. Das dazu angewendete Verfahren ist in [53] beschrieben. Es wäre möglich, diesen Schritt immer vor der Bestimmung der Abstände zwischen den Tankstellen auszuführen. Da dies zusätzliche Berechnungszeit erfordert und die Anzahl der insgesamt zu betrachtenden Routen mit 94 395 (435 Landkreise mal 434 jeweils übrige Landkreise, geteilt durch zwei, da Hin- und Rückroute identisch sind) hoch ist, wird dieses Verfahren jedoch nur dann angewendet, wenn es nötig ist. Ist für jede der 434 Routen bestimmt, ob sie bewältigt werden kann oder nicht, wird jede der Routen mit der Anzahl an Personenfahrten auf dieser Route pro Jahr multipliziert. Diese Daten können den Basisdaten der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 aus dem Jahr 2010 entnommen werden [13], die als Quelle-Ziel-Matrix für alle Landkreise inklusive der kreisfreien Städte und internationalen Flughäfen vorliegt.

Liegt der Anteil der mit FCEV möglichen Fernfahrten dabei über 75 %, werden die in dem jeweiligen Landkreis im Einzugsgebiet einer HRS lebenden Personen als erfasst gewertet. Es wird dann davon ausgegangen, dass für diese Menschen die infrastrukturellen Voraussetzungen für den Umstieg auf FCEV erfüllt sind. Die Zahl der so erfassten Personen ist das Bewertungskriterium für den Nutzen der untersuchten HRS-Infrastruktur für private PKW-Fahrer. Dieses Vorgehen bedeutet auch, dass nur Personen als erfasst gewertet werden können, die im Einzugsgebiet einer HRS leben. Befinden sich in einem Landkreis keine HRS, dann ist es unerheblich, ob Routen in andere Landkreise vom HRS-Netzwerk ermöglicht werden.

### 6.1.3. Optimierungsschritt 1: Optimale Positionen für HRS finden

Ziel dieses Optimierungsschritts ist es, für jede Stadt ideale Positionen für HRS zu finden (siehe Abbildung 6.3). Nur bestehende, konventionelle Tankstellen werden hier als mögliche Position von HRS vorgesehen. Die Standorte basieren auf Daten der Markttransparenzstelle für Kraftstoffe [47]. Die Koordinaten der zu positionierenden HRS sind die Entscheidungsvariablen der Optimierung. Sie können stufenlos vom Optimierungsalgorithmus variiert werden, sie werden jedoch anschließend übersetzt in die Koordinaten der jeweils am nächsten liegenden, konventionellen Tankstelle. Würde nur die Liste bestehender Tankstellen verwendet, bestünde für den Algorithmus kein geographischer Zusammenhang zwischen den Optionen. Durch den Koordinatenbezug wird dem Algorithmus hingegen ermöglicht, sich schrittweise dem Optimum anzunähern. Jede Stadt wird dabei unabhängig von den übrigen Städten betrachtet. Das Kriterium für die Güte der Tankstellenpositionen ist die Anzahl der Personen, die im Einzugsgebiet der HRS leben und somit als versorgt gelten. Grundlage sind Daten zur geographisch aufgelösten Bevölkerungsverteilung, die im 100 m mal 100 m-Raster vorliegen (Daten des Zensus 2011 [155]). In diesem Schritt ist unerheblich, wie viele Fahrten in andere Städte ermöglicht werden. Auch die Anzahl an zu positionierenden HRS sowie die Flottentypen, die versorgt werden müssen, werden nicht durch den Optimierungsalgorithmus festgelegt. Diese Entscheidungen werden erst in den späteren Optimierungsschritten getroffen und hier noch offengehalten. Deshalb wird in diesem Schritt die Optimierung für alle denkbaren Varianten aus der Anzahl an zu positionierenden HRS, Flottenkombinationen und Fernstraßenanschlüssen gesondert durchgeführt. Dazu werden diese Aspekte als Satz an Randbedingungen für jede Optimierung vorgegeben.

#### **Randbedingung: Anzahl an HRS**

Die Anzahl der HRS, die in einer Stadt zusätzlich zu den bereits bestehenden HRS positioniert werden sollen, ist variabel. Es werden verschiedene Fälle mit jeweils vorgegebenen HRS-Anzahlen vorgesehen. Die minimale Anzahl beträgt null, während die maximale Anzahl durch das Szenario vorgegeben ist und bis zu acht betragen kann (siehe Kapitel 6.2).

#### **Randbedingung: Flottenkompatibilität**

Das Tankstellennetzwerk soll gegebenenfalls den Betrieb verschiedener Flottentypen ermöglichen. Jeder der drei betrachteten Flottentypen stellt unterschiedliche Anforderungen an die räumliche Verteilung der HRS. So erfordern Carsharing-Fahrzeuge, dass mindestens 50 % der Bevölkerung einer Stadt im Einzugsgebiet (maximal 2833 m Entfernung) einer HRS liegen (siehe Kapitel 4.4). Taxis erfordern, dass mindestens 50 % der Taxistände im Einzugsgebiet liegen (siehe Kapitel 4.3), während für einen Busbetrieb eine HRS in höchstens 1667 m Entfernung (entspricht 10 Minuten Fahrtzeit) zu einem Busdepot liegen muss (siehe Kapitel 4.2). Diese Anforderungen gelten

jeweils unabhängig von der Flottengröße. In späteren Optimierungsschritten soll keine Einschränkung bezüglich der zu wählenden Flottentypen bestehen, deshalb wird hier jede denkbare Kombination von Flottentypen separat betrachtet. Einschließlich des Falls ohne Flotten gibt es somit bis zu acht Kombinationen, die jeweils mit unterschiedlichen Anforderungen an die Tankinfrastruktur einhergehen. Für Städte, die nicht jeden Flottentyp erlauben, gibt es entsprechend weniger Kombinationen, die betrachtet werden. Bevölkerungsdaten werden aus [155] und Positionen der Taxistände [156] (basierend auf OpenStreetMap-Daten [157]) entnommen.

### **Randbedingung: Fernstraßenanschluss**

Ob eine HRS in einer Stadt nützlich für das spätere städteübergreifende Gesamtnetzwerk ist, hängt davon ab, ob sie in der Nähe anderer Routen liegt. Dies soll und kann in diesem Optimierungsschritt jedoch nicht direkt berücksichtigt werden, da hier die Städte unabhängig voneinander betrachtet werden. Stattdessen werden zusätzliche Randbedingungen hinsichtlich des Fernstraßenanschlusses definiert. Dazu wird für jede Stadt zunächst ermittelt, welche der Routen zwischen Städten überhaupt von Tankstellen in der betrachteten Stadt versorgt werden könnten. Das dafür angelegte Kriterium ist der Abstand einer Tankstelle (also einer potentiellen HRS) zu den Fernstraßen der jeweiligen Route, der 3 km nicht übersteigen darf. Für jede der Routen werden dann die Tankstellen in der betrachteten Stadt ermittelt, die diese Bedingung erfüllen. Für jede Route besteht somit eine Liste mit Tankstellenpositionen. Würde im späteren Verlauf der Optimierung eine dieser Tankstellen als Standort für eine HRS ausgewählt, könnte sie auch zum Tanken auf der betreffenden Route genutzt werden. Diese Listen werden nun verwendet, um zusätzliche Randbedingungen zu definieren. Sie basieren darauf, dass mit der Positionierung von HRS auch andere Routen versorgt werden sollen. Das heißt, um eine bestimmte Route zu versorgen, muss mindestens eine der Tankstellenpositionen auf der zugehörigen Liste für den Aufbau einer HRS gewählt werden. Es werden nun je Stadt so viele, jeweils alternative Randbedingungen definiert, wie es Kombinationen aus Routen gibt. Beträgt die Anzahl der Routen  $n_{\text{Routen}}$ , so ergibt sich die Anzahl an Kombinationen mit  $n_{\text{Routenkombinationen}} = 2^{n_{\text{Routen}}}$ . Bei beispielsweise drei Routen, die mit HRS in der betrachteten Stadt versorgt werden könnten, ergäben sich acht Kombinationen, einschließlich des Falls, dass keine der Routen versorgt werden muss. Um den späteren Berechnungsaufwand zu begrenzen, sollte die Anzahl an Randbedingungen so gering wie möglich gehalten werden. Deshalb werden die Listen mit Tankstellenpositionen zusammengefasst, die sich zu einem bestimmten Anteil (abhängig vom Szenario) überschneiden. Dazu werden die weniger restriktiven Listen, die also mehr mögliche Tankstellenpositionen zulassen, gelöscht. Zusätzlich werden die Listen gelöscht, die bereits bestehende HRS enthalten, da die zugehörigen Routen unabhängig von der späteren Positionierung von neuen HRS bereits versorgt werden können.

Aus diesen drei Gruppen zusätzlicher Randbedingungen — Anzahl an HRS, Flottenkompatibilität, Fernstraßenanschluss — werden nun alle Kombinationen gebildet.

## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

Für das Beispiel einer Stadt, in der alle drei Flottentypen (acht Kombinationen) und vier Fernstraßenanschlüsse (16 Kombinationen) möglich sind, würde sich bei neun möglichen HRS-Varianten  $8 \cdot 16 \cdot 9 = 1152$  Kombinationen ergeben. Dieser erste Optimierungsschritt wird daher nicht nur einmal für diese Stadt ausgeführt, sondern entsprechend der jeweiligen Anzahl an Randbedingungskombinationen, im Folgenden Varianten genannt, vielfach. Es gibt also in dem genannten Beispiel nach der Optimierung ideale HRS-Positionen für eine Variante, in der unter dem Einsatz von vier zusätzlichen HRS ein Carsharing- und Busbetrieb ermöglicht wird und gleichzeitig zwei der vier Fernstraßenanschlüsse versorgt werden. Ebenso gibt es ein Ergebnis für die Variante, in der drei HRS eingesetzt werden und damit ein Taxibetrieb ermöglicht wird, ungeachtet möglicher Fernstraßenanschlüsse, ebenso wie für die übrigen 1150 Varianten. Jedes Optimierungsergebnis wird gespeichert und kann in weiteren Optimierungsschritten weiterverwendet werden.

Es kann Varianten geben, in denen nicht allen Randbedingungen genügt werden kann. So ist es beispielsweise in einer Stadt ohne bestehende HRS nicht möglich, ohne den Einsatz neuer HRS die Flottenanforderungen zu erfüllen. Auch mit dem Einsatz zusätzlicher HRS kann es sein, dass nicht den Anforderungen aller Flottentypen entsprochen werden kann. In diesen Fällen wird auch das Scheitern der Optimierung gespeichert. Während des Optimierungsprozesses wird das Maß der Verletzung der Randbedingungen quantifiziert und für den Prozess verwendet. So kann der Algorithmus verschiedene Tankstellenpositionierungen, die jeweils die Randbedingungen verletzen, in ihrer Qualität bewerten und unterscheiden. Eine Konfiguration, die eine Randbedingung nur leicht verletzt (wenn beispielsweise nur 45 % der Taxistände versorgt werden können), kann so dennoch ein wertvolles Individuum für den Genetischen Algorithmus sein, von dem sich durch leichte Variation eine andere Konfiguration ableiten lässt, die die Randbedingung nicht mehr verletzt.

Um die hohe Anzahl an erforderlichen Optimierungen zu begrenzen, werden Heuristiken genutzt. So werden zunächst die Varianten mit einer hohen Anzahl an zu positionierenden HRS optimiert. Scheitert die Optimierung, also kann keine Lösung gefunden werden, die die Randbedingungen nicht verletzt, so können auch alle Varianten, die hinsichtlich der anderen Randbedingungen identisch sind, aber weniger HRS vorsehen, nicht erfolgreich sein. In diesen Fällen kann der Optimierungsprozess entfallen. Auch Varianten, die nicht identisch, sondern restriktiver sind als die bereits gescheiterte Variante (zum Beispiel, weil sie zusätzliche Flottentypen vorsehen), müssen nicht betrachtet werden, da auch ihr Scheitern gewiss ist. Auf diese Weise kann ein nennenswerter Teil der Optimierungen entfallen. Auch falls eine Optimierung erfolgreich ist, kann geprüft werden, ob sich das Ergebnis auf andere Varianten übertragen lässt. Dazu wird ermittelt, ob die gefundene Lösung auch gültig für alle restriktiveren Varianten mit gleicher HRS-Anzahl ist. In dem Fall kann sie auch als optimal für diese Varianten angesehen werden und weitere Optimierungsvorgänge können eingespart werden.

Um lokale Optima zu vermeiden, werden zwei Maßnahmen ergriffen. Erstens wird

die Optimierung für jeden Fall mehrmals ausgeführt und das jeweils beste Ergebnis übernommen. Zweitens werden jeweils Fälle verglichen, die hinsichtlich aller Parameter bis auf die Flottenzusammensetzung identisch sind. Wenn eine der Varianten restriktiver als die andere ist — beispielsweise, weil die erste einen Busbetrieb und die zweite einen Busbetrieb und einen Taxibetrieb ermöglichen muss — dann ist zu erwarten, dass für die weniger restriktive ein mindestens ebenso gutes Ergebnis erreicht wird. Ist dies nicht der Fall, kann das Ergebnis der restriktiveren Variante übernommen werden.

Gegenüber der in Kapitel 6.1 diskutierten, umfänglichen Optimierung, die sämtliche hier und im Folgenden vorgestellten Optimierungsschritte umfasst, weist der hier gezeigte Ansatz Nachteile auf. So werden zwar grundsätzlich Informationen über die Nützlichkeit von HRS-Positionen im Hinblick auf das gesamte Tankstellennetz für folgende Schritte bewahrt, da Lösungen für jede mögliche Kombination an Fernstraßenanschlüssen gespeichert werden. Allerdings wird nur jeweils eine gültige Lösung gespeichert, die optimal hinsichtlich des Ziels dieses Optimierungsschritts ist. In dieser ist mindestens eine HRS in Reichweite zu den jeweils in Betracht genommenen Fernstraßen positioniert. Dabei ist jedoch unerheblich, an welcher Stelle der Fernstraße die jeweilige Tankstelle liegt und wie weit sie tatsächlich entfernt ist. Relevant ist nur, dass die Entfernung weniger als 3 km beträgt. Es kann somit sein, dass im Hinblick auf das spätere Gesamtnetzwerk eine andere Lösung noch besser geeignet ist, die in diesem Schritt jedoch nicht identifiziert wird. Für die Untersuchung in dieser Arbeit wird dieser Nachteil jedoch in Kauf genommen, da das hier dargestellte Vorgehen eine geeignete Optimierung durch eine erhebliche Rechenzeitverkürzung auf weniger als einen Tag Berechnungsdauer<sup>1</sup> überhaupt erst ermöglicht. Zudem wird der entstehende Fehler als wenig relevant angesehen, da es um Unterschiede in der HRS-Positionierung entlang einer mehrere hundert Kilometer langen Route im Bereich weniger Kilometer geht. Darüber hinaus ist diskussionswürdig, dass nur in dem jeweiligen Landkreis lebende Menschen berücksichtigt werden. Wird eine HRS in der Nähe der Landkreisgrenze positioniert, so bleiben die im Einzugsgebiet lebenden Personen unberücksichtigt, wenn sie in benachbarten Landkreisen leben. Diese Entscheidung wird getroffen, um eine klare Definition des Betrachtungsgebiets und Konsistenz im verwendeten Ansatz zu ermöglichen.

Ergebnis dieses Optimierungsschritts sind HRS-Positionen, die ideal sind im Hinblick auf die Anzahl der in ihrem Einzugsgebiet lebenden Personen. Diese Positionen liegen für alle möglichen Varianten aus HRS-Anzahl (bis zu neun Varianten), Flottenkompatibilität (bis zu acht Kombinationen) und Fernstraßenanschlüssen (unterschiedlich je Stadt) vor.

---

<sup>1</sup>Durchgeführt auf einem System mit AMD Threadripper 1950X mit 16 Kernen und 32 GB Arbeitsspeicher

#### 6.1.4. Optimierungsschritt 2: Optimale Flottenkombinationen und HRS-Anzahlen finden

Im zweiten Optimierungsschritt sollen nun für jede Stadt die Konfigurationen aus Flotten und Tankstellen gefunden werden, die einerseits möglichst geringe jährliche Verluste aus Aufbau und Betrieb der Infrastruktur verursachen und andererseits eine möglichst hohe Bevölkerungsabdeckung bieten. Diese beiden Ziele sind nicht gleichzeitig vollumfänglich erreichbar, sodass mehrere Lösungen erwartet werden, die jeweils unterschiedlich ausgeprägte Kompromisse zwischen den beiden Zielen darstellen (siehe Abbildung 6.3).

Zur Optimierung wird wie auch im ersten Optimierungsschritt der bereits vorgestellte Genetische Algorithmus verwendet. Entscheidungsvariablen sind die jeweiligen Flottengrößen (Carsharing, Taxi, Bus). Diese können zwischen 10 und 200 (Carsharing), 10 und 100 (Taxi) beziehungsweise 1 und 10 (Bus) mit einer Schrittweite von 1 variiert werden. Zusätzlich werden drei bool'sche Entscheidungsvariablen hinzugefügt, mit denen je eine Flotte vorgesehen oder entfernt werden kann. Eine siebte Entscheidungsvariable ist die Anzahl der HRS, die zusätzlich zu gegebenenfalls bereits bestehenden HRS vorgesehen werden. Diese kann zwischen 0 und dem im jeweiligen Szenario vorgesehenen Maximum variiert werden. Die Optimierung wird für jede Stadt und für jede mögliche Fernstraßenanschlusskombination der jeweiligen Stadt durchgeführt.

Individuen der Optimierung sind also definiert durch die Flottenkombination und die Anzahl vorzusehender HRS. Zusätzlich sind für jede Optimierung die jeweilige Stadt und die Fernstraßenanschlusskombination bekannt und konstant. Für jede denkbare Kombination aus diesen Eigenschaften existieren in den Ergebnissen aus dem ersten Optimierungsschritt ideale HRS-Positionen. Individuen werden nun evaluiert, indem eben diese Positionen verwendet werden. Das in Kapitel 6.1.1 beschriebene Verfahren wird angewendet, um für die zu evaluierende Kombination aus HRS und Flotten die resultierenden Verluste zu bestimmen. Die korrespondierende Bevölkerungsabdeckung kann direkt den zugehörigen Ergebnissen aus dem ersten Optimierungsschritt entnommen werden.

Dieser Schritt besteht jedoch nicht nur daraus, den Ergebnissen des ersten Optimierungsschritts jeweils einen Wert für die Wirtschaftlichkeit zuzuweisen. Dies wäre der Fall, wenn der zweite Schritt nicht nur für jede Stadt und jede mögliche Fernstraßenanschlusskombination, sondern auch für jede Flottenkombination und jede untersuchte HRS-Anzahl durchgeführt würde. Stattdessen wird die Anzahl der HRS als Entscheidungsvariable gewählt, sodass die entstehenden Optimierungsergebnisse jeweils Lösungen mit verschiedenen HRS-Anzahlen enthalten. Dies war im ersten Schritt nicht möglich, da als einziges Optimierungsziel die Bevölkerungsabdeckung galt und eine Konfiguration mit möglichst hoher Anzahl HRS als optimal erkannt worden wäre. Außerdem kann die Flottenkombination im zweiten Optimierungsschritt als Entscheidungsvariable gewählt werden, da es nicht mehr erforderlich ist, Informationen für

jede denkbare Flottenkombination zu speichern, sondern nur noch die günstigsten Flottenkombinationen relevant sind. Entsprechend fällt die Anzahl an durchzuführenden Optimierungsvorgängen gegenüber dem ersten Optimierungsschritt geringer aus.

Ergebnis jeweils einer Optimierung ist eine Pareto-Front, deren Elemente Kompromisse zwischen geringen Verlusten und einer hohen Bevölkerungsabdeckung darstellen. Eigenschaften dieser Lösungen sind die Anzahl der Flottenfahrzeuge, eine Anzahl an zusätzlichen HRS sowie deren Positionen (bekannt aus dem ersten Optimierungsschritt).

Wie auch im ersten Optimierungsschritt, bestehen Nachteile gegenüber einer theoretischen, umfassenden Optimierung. Eine der Annahmen, die der Trennung des Optimierungsproblems in drei Teile zugrunde liegt, ist, dass die HRS-Positionen und die jährlichen Verluste aus Aufbau und Betrieb der HRS unabhängig voneinander sind. Dies ist jedoch nicht in jedem Fall gültig. Die Verluste einer HRS hängen nämlich von der Anzahl der zu versorgenden Fahrzeuge ab. Diese wird gemäß Kapitel 6.1.1 für Carsharing-Fahrzeuge entsprechend der erfassten Bevölkerung und für Taxis entsprechend der erfassten Taxistände zugewiesen. Dabei ist die Gesamtanzahl der von den HRS zu versorgenden Fahrzeuge konstant, lediglich die Aufteilung auf verschiedene HRS ist davon beeinflusst. Eine etwaig abweichende Aufteilung auf die HRS kann zu Unterschieden in der Gesamtwirtschaftlichkeit führen, da die HRS-Verluste nicht linear mit den zu versorgenden Fahrzeugen zusammenhängen. Die getroffene Annahme gilt demnach dann nicht, wenn die Verteilung der Bevölkerung beziehungsweise der Taxistände inhomogen innerhalb der Erfassungsgebiete ist. Für Busse gilt dies nicht, da stets einer HRS die gesamte Busnachfrage zugewiesen wird. Die Auswirkungen dieser nur eingeschränkt gültigen Annahme werden allerdings als gering eingeschätzt, da davon ausgegangen wird, dass die Anzahl der HRS einen maßgeblich größeren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des HRS-Netzwerks hat als die Zuweisung der Fahrzeuge auf diese HRS.

Ergebnis dieses Optimierungsschritts sind Flottenkombinationen mit der zugehörigen HRS-Infrastruktur (Dimensionierung, Wirtschaftlichkeit und Positionen), die entweder zu geringen Verlusten oder zu einer hohen HRS-Abdeckung der Bevölkerung führen — oder zu Kompromissen aus diesen beiden Zielen. Diese Ergebnisse liegen für alle Städte und jeweils alle Fernstraßenanschlusskombinationen vor.

### **6.1.5. Optimierungsschritt 3: Optimales Netzwerk aus HRS und Flotten bestimmen**

Der dritte und letzte Optimierungsschritt dient dazu, ein optimales Gesamtnetzwerk aus HRS und Flotten zu finden. Im Gegensatz zu den ersten beiden Optimierungsschritten werden dazu nun alle ausgewählten Städte im Betrachtungsgebiet gleichzeitig behandelt (siehe Abbildung 6.3). Die Optimierungsziele sind einerseits möglichst

## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

geringe jährliche Verluste aus Aufbau und Betrieb der HRS und andererseits ein möglichst hoher Nutzen der auszulegenden Infrastruktur für private PKW-Fahrer. Der Nutzen der Infrastruktur wird quantifiziert, indem ermittelt wird, wie vielen Personen sie den Umstieg auf ein FCEV ermöglicht (siehe Kapitel 6.1.2). Diese beiden Ziele sind konträr, also im Allgemeinen nicht gleichzeitig erreichbar. Denn ein weitverzweigtes HRS-Netzwerk, das in jeder der betrachteten Städte mindestens eine HRS vorsieht, hätte zwar einen hohen Nutzen für private Fahrzeugbetreiber, würde aber auch mit entsprechend hohen Verlusten einhergehen. Umgekehrt führt ein spärliches Netzwerk zu niedrigen Verlusten, bedeutet aber auch einen geringen Nutzen.

Um die besten Kompromisse hinsichtlich dieser beiden Ziele zu erreichen, wird der schon zuvor beschriebene und eingesetzte Genetische Algorithmus verwendet. Dieser wählt für jede Stadt auf Basis der bisherigen Ergebnisse aus, welche Flotten und die dazugehörige Infrastruktur aufgebaut werden sollen. Dabei müssen nun nicht mehr alle denkbaren Kombinationen und Varianten aus Flotten, HRS-Anzahl und -Positionen separat betrachtet und verglichen werden, sondern es kann auf die Optimierungsergebnisse der ersten beiden Schritte zurückgegriffen werden. Diese bestehen in idealen HRS-Positionen und den besten Kombinationen aus Flotten und HRS. Dabei gibt es nicht je Stadt eine ideale Kombination, sondern verschieden ausgeprägte Kompromisse hinsichtlich der beiden Optimierungsziele (geringe Verluste, hohe Bevölkerungsabdeckung). Diese liegen zudem nicht nur für jede Stadt vor, sondern außerdem für verschiedene Anforderungen an den Anschluss von Fernstraßen an das HRS-Netzwerk. All diese möglichen Konfigurationen beziehungsweise Kompromisse (und nur diese) werden nun in Betracht gezogen.

Eine Entscheidungsvariable der Optimierung ist deshalb für jede Stadt die Anzahl der Personen, die im Einzugsgebiet einer HRS leben sollen. Der Wertebereich dieser Variablen liegt zwischen 0 und dem Maximum, das im zweiten Optimierungsschritt für die jeweilige Stadt erreicht wurde. Mit dieser Variablen wird also für die jeweilige Stadt der Kompromiss aus der Anzahl der Personen im Einzugsbereich einer HRS und geringen Verlusten gewählt. Im vorherigen Optimierungsschritt wurde jedoch nicht nur eine Pareto-Front je Stadt ermittelt, sondern eine für jede mögliche Fernstraßenanschlusskombination. In diesem dritten Schritt kann deshalb nun mit einer zweiten Entscheidungsvariable für jede Stadt gewählt werden, welche Fernstraßenanschlüsse mit HRS versorgt werden sollen. Der Wertebereich liegt zwischen 1 und der Anzahl der Kombinationen in der jeweiligen Stadt. Zusätzlich wird je Stadt eine bool'sche Entscheidungsvariable definiert, mit der entschieden wird, ob in der Stadt überhaupt Flotten und zusätzliche Infrastruktur vorgesehen werden sollen. Diese Variable mag redundant erscheinen, da grundsätzlich der gleiche Effekt erreicht wird, indem die ersten beiden Entscheidungsvariablen entsprechend gewählt werden. Dennoch ist diese dritte Variable für den Optimierungsprozess wichtig, da diese grundlegende Entscheidung andernfalls nur durch die Wahl genau eines Wertes (0) in einem weit gefassten Wertebereich (0 bis mehrere Tausend erfasste Einwohner) getroffen werden könnte. Es gibt demnach je 3 Entscheidungsvariablen pro Stadt des Betrachtungsgebiets.

Ein Individuum im Sinne des Optimierungsverfahrens ist daher definiert durch Eigenschaften, die für jede Stadt festlegen, welche Flotten und zugehörigen HRS installiert und an welchen der Fernstraßen HRS errichtet werden sollen. Im Rahmen der Optimierung wird jedes Individuum hinsichtlich der beiden Optimierungsziele bewertet. Da die Bestimmung des Nutzens (siehe Kapitel 6.1.2) einen hohen Berechnungsaufwand erfordert, werden im Vorfeld der Optimierung Vorberechnungen durchgeführt, die andernfalls bei der Evaluation jedes Individuums wiederholt ausgeführt werden müssten. Dabei handelt es sich um die Prüfung, ob Routen mit FCEV bewältigt werden können. Dies hängt im Allgemeinen von den Entscheidungsvariablen der Individuen ab, es kann jedoch Routen geben, die davon unabhängig sind. Um diese Vorprüfungen durchführen zu können, wird zunächst für jede Route bestimmt, welche der bestehenden HRS und der möglichen HRS-Positionen (in den betrachteten Städten) weniger als 3 km entfernt sind. Dann kann in den folgenden Fällen vorab bestimmt werden, ob eine Route möglich ist.

### **Fall 1: Betrachtung unnötig**

Ist ein Landkreis nicht Teil der betrachteten Städte und besteht bislang keine HRS in diesem Landkreis, so muss keine der von diesem Landkreis ausgehenden Routen betrachtet werden. Denn in diesem Landkreis leben keine Personen im Einzugsgebiet einer HRS, sodass auch der Nutzen des Gesamtnetzwerks nicht davon abhängt, ob Routen aus diesem Landkreis in andere Städte möglich sind.

### **Fall 2: Route ist immer möglich**

Verfügt ein Landkreis über eine bestehende HRS, dann sind Routen in alle anderen Landkreise möglich, die weniger als die Hälfte der Fahrzeugreichweite entfernt sind. In diesem Fall kann der Fahrer mit einer Tankfüllung zum Ziel und zurück gelangen. Diese Routen müssen somit später nicht erneut geprüft werden, da sie unabhängig von den Entscheidungsvariablen möglich sind. Für den Fall, dass ein Landkreis eine der betrachteten Städte ist und noch nicht über eine bestehende HRS verfügt, dann sind die oben genannten Routen möglich, sobald mindestens eine HRS vorgesehen wird. Für Individuen, auf die das zutrifft, muss die Route deshalb nicht erneut geprüft werden. Für alle übrigen Individuen, die keine HRS in diesem Landkreis vorsehen, müssen die oben genannten Routen ohnehin nicht geprüft werden, da dann niemand in diesem Landkreis im Einzugsgebiet einer HRS lebt (siehe Fall 1).

### **Fall 3: Route ist nie möglich**

Befinden sich entlang einer Route weder bestehende HRS noch mögliche HRS-Positionen (also konventionelle Tankstellen in den Landkreisen des Betrachtungsgebiets) und ist die Route länger als die halbe Fahrzeugreichweite, dann ist diese Route nicht möglich. Es besteht keine Abhängigkeit von den Entscheidungsvariablen der Individuen, sodass diese Routen vorab identifiziert und von einer späteren Prüfung ausgeschlossen werden können.

#### **Fall 4: Route kann vorab geprüft werden**

Befinden sich entlang einer Route zwar bestehende HRS aber keine möglichen zusätzlichen HRS-Positionen, dann kann diese Route vorab mit Hilfe der in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Methodik geprüft werden. Das Ergebnis der Prüfung ist nämlich unabhängig von den Entscheidungsvariablen und gilt demnach für alle Individuen.

Zusätzlich werden alle verbleibenden Routen mit der Methodik aus Kapitel 6.1.2 geprüft unter der Annahme, dass keine weiteren als die bestehenden HRS vorgesehen werden. Im Erfolgsfall gilt grundsätzlich, dass die jeweilige Route möglich ist. Im Misserfolgsfall kann keine Aussage getroffen werden, da der Erfolg davon abhängt, ob weitere HRS vorgesehen werden.

Diese Vorberechnungen reduzieren die Anzahl der später für jedes Individuum im Rahmen der Evaluation zu prüfenden Routen. Für die Evaluation der Individuen werden zunächst auf Basis der Entscheidungsvariablen für jede Stadt die zugehörigen Ergebnisse aus den ersten beiden Optimierungsschritten ausgewählt. Diese beinhalten Informationen über die Anzahl und Position von HRS, die Flottengrößen und die entstehenden jährlichen Gewinne oder Verluste durch Aufbau und Betrieb dieser HRS sowie die Anzahl der Personen, die im Einzugsgebiet einer HRS leben. Auf Basis der HRS-Standorte wird dann der Nutzen des Gesamtnetzwerks für private Nachfrager bestimmt (siehe Kapitel 6.1.2), das heißt, wie vielen Personen das HRS-Netzwerk den Umstieg auf ein FCEV ermöglicht. Dabei müssen nur die Routen geprüft werden, deren Validität nicht schon zuvor bestimmt werden konnte. Die Wirtschaftlichkeit des HRS-Netzwerks wird bestimmt, indem die jährlichen Gewinne oder Verluste des HRS-Netzwerks jeder Stadt addiert werden.

Der Aufbau zusätzlicher HRS wird zwar nur in den betrachteten Städten vorgesehen, bei der Bewertung des Nutzens des Gesamtnetzwerks wird jedoch das gesamte Bundesgebiet herangezogen. Auch für in anderen Städten lebende Menschen wird ermittelt, welcher Anteil ihrer Routen möglich ist und ob sie im Einzugsgebiet einer (bestehenden) HRS leben. Außerdem spielt das übrige Bundesgebiet auch für die Betrachtung der hier ausgewählten Städte in den neuen Bundesländern eine Rolle als mögliches Fahrtziel.

## **6.2. Szenarien**

Die zuvor beschriebene Methodik wird auf insgesamt fünf Szenarien angewendet, die in zwei Gruppen unterteilt sind. Mit den Szenarien der ersten Gruppe werden die neuen Bundesländer detailliert betrachtet. Die Methodik und Teilergebnisse werden ausführlich diskutiert. Mit den Szenarien der zweiten Gruppe hingegen wird der Ansatz auf das gesamte Bundesgebiet angewendet, um das Potential von FCEV-Flotten für ganz Deutschland bewerten zu können.

### 6.2.1. Szenarien 1a und 1b: Detailanalyse für die neuen Bundesländer

Das Gebiet, in dem der Aufbau neuer HRS vorgesehen werden soll, beschränkt sich in diesen Szenarien auf die neuen Bundesländer inklusive Berlin. Auf dieses Gebiet entfallen 20 % der Bevölkerung und 30 % der Fläche der Bundesrepublik Deutschland [158]. Auf die neuen Bundesländer ohne Berlin entfallen 15 % der Bevölkerung. Von den bislang errichteten oder geplanten HRS befinden sich allerdings nur 11 % in den neuen Bundesländern ohne Berlin. Inklusive Berlin beträgt der Anteil 20 %. Man kann somit feststellen, dass der HRS-Ausbau in den neuen Bundesländern — abgesehen von Berlin — bislang nachrangig stattfindet. Der hier verfolgte Ansatz des Aufbaus von HRS für Flotten hat demnach in diesem Gebiet das Potential, einen besonders hohen Nutzen für das HRS-Netzwerk und den Anschluss der Bevölkerung an das bestehende HRS-Netzwerk zu erreichen. Gleichwohl wird das gesamte Bundesgebiet zur Bewertung des Nutzens des HRS-Netzwerks für private PKW-Fahrer herangezogen. Städte mit mindestens 100 000 Einwohnern (Stand 31.12.2016 gemäß [158]) und Schwerin als einzige Landeshauptstadt mit weniger Einwohnern werden in diesen Szenarien für den Aufbau von weiteren HRS vorgesehen. Insgesamt werden somit zwölf Städte betrachtet. Die Anzahl zusätzlicher HRS je Stadt wird auf acht festgelegt, um die Berechnungsdauer zu begrenzen. Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass dies für die Betrachtung der Initialphase des Infrastrukturaufbaus eine ausreichend hohe Zahl darstellt.

In den Städten wird die teilweise Umstellung von Carsharing-, Taxi-, und Busflotten auf FCEV als möglich angenommen, sofern es jeweils bereits den jeweiligen Flottentyp in der Stadt gibt. Aufgrund der Ergebnisse aus Kapitel 5, die für Busflotten keine Vorteile gegenüber dem Referenzfall ohne Flotten ausweisen, ist davon auszugehen, dass Busse nicht Teil einer optimalen Konfiguration aus Flotten und HRS sind. Trotzdem werden Busse in diesen Szenarien berücksichtigt, um Zwischenergebnisse auch für diesen Flottentyp zu diskutieren. Tabelle 6.1 zeigt die betrachteten Städte und die jeweils identifizierten Flottenfahrzeuge. Im Folgenden wird beschrieben, welche Annahmen für die jeweiligen Flottenfahrzeuge getroffen werden.

#### Busse

Grundlage ist der Bestand an Linienbussen, während Überland- und Regionalbusse nicht betrachtet werden. Es wird angenommen, dass jeweils nur 50 % der konventionellen Busse durch FCEB ersetzt werden können, höchstens aber jeweils 10 Fahrzeuge. Dieser Grenzwert wird gewählt, da für größere Busflotten davon ausgegangen wird, dass eine betriebshofeigene Tankinfrastruktur erforderlich ist und keine öffentlichen Tankstellen mehr genutzt werden können. In Kapitel 5 wurde passend zu diesen Annahmen die Wirtschaftlichkeit von HRS für bis zu 10 Busse berechnet.

## 6. Auslegung eines H<sub>2</sub>-Initialnetzwerks

### Taxis

Für jede Stadt wird der Bestand an Taxis  $n_{\text{Taxi, Stadt}}$  ermittelt oder abgeschätzt, wenn keine Daten vorliegen. Diese Abschätzung erfolgt über den für das jeweilige Bundesland angegebenen Taxibestand  $n_{\text{Taxi, BL}}$  [159], die Einwohnerzahl im Bundesland  $n_{\text{EW, BL}}$  [158] und die Einwohnerzahl der Stadt  $n_{\text{EW, Stadt}}$  [158]. Es wird angenommen, dass gilt  $n_{\text{Taxi, Stadt}} = n_{\text{Taxi, BL}} \cdot \frac{n_{\text{EW, Stadt}}}{n_{\text{EW, BL}}}$ . Außerdem wird die Annahme getroffen, dass jeweils nur ein Teil der Taxiflotte auf FCEV umgestellt werden kann und zwar 50%, höchstens jedoch 100 Fahrzeuge.

### Carsharing

Es werden nur die Städte berücksichtigt, die mindestens 20 Carsharing-Fahrzeuge eines einzigen Anbieters aufweisen. Da der Anbieter teilAuto zusammen mit dem kooperierenden Unternehmen Flinkster in allen Städten im Betrachtungsgebiet (abgesehen von Berlin) die meisten Fahrzeuge anbietet, wird dessen Flotte als Kriterium herangezogen. Es wird angenommen, dass alle in den jeweiligen Städten verfügbaren Fahrzeuge durch FCEV ersetzt werden können, höchstens jedoch 200.

Zusätzlich zu diesen Annahmen werden Parameter der drei Optimierungsschritte festgelegt. Um die Anzahl der möglichen Fernstraßenanschlusskombinationen je Stadt zu begrenzen, werden die den Fernstraßenanschlüssen jeweils zugeordneten Tankstellen-Listen vereint, wenn mindestens 80% der Listeninhalte übereinstimmen (siehe Kapitel 6.1.3). Für den ersten Optimierungsschritt ergeben sich für jeden Optimierungsvorgang 16 Entscheidungsvariablen, da bis zu acht HRS mit je zwei Koordinaten positioniert werden. Als Populationsgröße wird 600 und als maximale Generationenzahl 60 gewählt. Im zweiten Optimierungsschritt bestehen unabhängig vom Szenario sieben Entscheidungsvariablen (siehe Kapitel 6.1.4). Als Populationsgröße wird ebenfalls 600 und als maximale Generationenzahl 60 gewählt. Im dritten Optimierungsschritt bestehen für jede Stadt drei Entscheidungsvariablen, insgesamt also 36. Es wird eine Populationsgröße von 600 Individuen und wegen der vergleichsweise hohen Anzahl an Entscheidungsvariablen eine Generationenzahl von 120 gewählt.

Die Szenarien 1a und 1b sind hinsichtlich aller bislang gewählten Annahmen und Randbedingungen identisch. Sie unterscheiden sich jedoch bezüglich des angenommenen, bestehenden HRS-Netzwerks. Grundsätzlich werden online einsehbare Informationen von H2 Mobility [7] zum Status des HRS-Netzwerks, Stand 15.12.2017, verwendet. Dort ist für jeden bestehenden und geplanten HRS-Standort vermerkt, ob die HRS in Betrieb, in Planung oder außer Betrieb ist. Für Szenario 1a werden alle HRS verwendet, die in Betrieb oder in Planung sind (71). Für Szenario 1b werden davon abweichend in den zwölf betrachteten Städten nur HRS verwendet, die in Betrieb sind (insgesamt 66). Abbildung 6.4 zeigt das Betrachtungsgebiet sowie die jeweils angenommenen, bestehenden HRS.

Tabelle 6.1.: Anzahl der Flottenfahrzeuge im Betrachtungsgebiet der Szenarien 1a und 1b

Stadt	Busse		Taxis		Carsharing-Fahrzeuge	
	Anzahl	Quelle	Anzahl	Quelle	Anzahl	Quelle
Berlin	1379	[160]	7897	[67]	>2000	[161], [162]
Chemnitz	81	[163]	223	[164]	21	[140]
Cottbus	48	[165]	81 <sup>1</sup>	[158], [159]	0	[140]
Dresden	140	[166]	465	[167]	250	[140]
Erfurt	59	[168]	103 <sup>1</sup>	[158], [159]	65	[140]
Halle (Saale)	58	[169]	160	[164]	71	[140]
Jena	44	[170]	38	[171]	44	[140]
Leipzig	158	[172]	664	[167]	250	[140]
Magdeburg	51	[173]	146	[174]	30	[140]
Potsdam	59	[175]	130	[176]	0	[140]
Rostock	68	[177]	188	[167]	0	[140]
Schwerin	40	[178]	80	[179]	0	[140]

<sup>1</sup> Abgeschätzt auf Basis der genannten Quellen

## 6. Auslegung eines H<sub>2</sub>-Initialnetzwerks

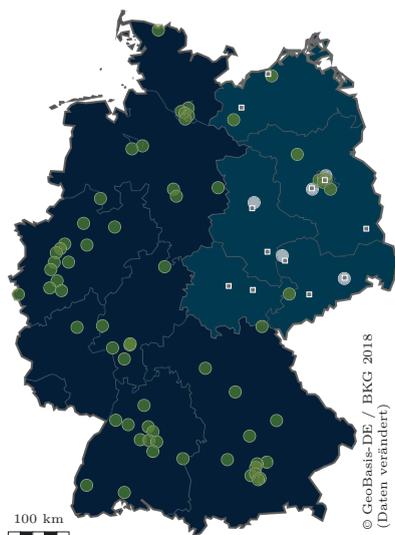


Abbildung 6.4.: Betrachtete Städte (Quadrate) und angenommene, bestehende HRS (Kreise). Szenario 1a: weiß und grün, Szenario 1b: grün

### 6.2.2. Szenarien 2a, 2b und 2c: Übertragung auf das Bundesgebiet

In diesen Szenarien wird die Methodik auf das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland angewendet. Das heißt, die zu positionierenden HRS können im gesamten Bundesgebiet vorgesehen werden. In allen Städten mit mindestens 100 000 Einwohnern [158] werden vom Optimierungsalgorithmus bis zu sechs HRS positioniert. Insgesamt werden 80 Städte berücksichtigt (siehe Tabelle 6.2). In zwölf Fällen handelt es sich nicht um kreisfreie Städte. Da die geographische Auflösung der Daten auf Landkreisebene beschränkt ist, werden in diesen Fällen an Stelle der Städte die entsprechenden Landkreise verwendet. Dadurch wird eine teils deutlich höhere Zahl an Einwohnern berücksichtigt. Die Verringerung der maximalen Anzahl zusätzlicher HRS je Stadt gegenüber den Szenarien 1a und 1b erfolgt, um die durch die erheblich höhere Anzahl an betrachteten Städten deutlich steigende Berechnungsdauer zu begrenzen.

Im Gegensatz zu den vorherigen Szenarien werden nur noch Carsharing- und Taxiflotten untersucht. Busflotten wurden unter den gewählten Randbedingungen als nicht vorteilhaft erkannt (siehe Kapitel 5) und können bereits im Rahmen der vorherigen Szenarien diskutiert werden. Darüber hinaus orientiert sich die angenommene maximale Anzahl der jeweiligen FCEV in den Städten nicht mehr am gegenwärtigen Bestand. Stattdessen werden je 2000 Einwohner ein Carsharing-Fahrzeug und zwei Taxis angenommen.

Tabelle 6.2.: Berücksichtigte Städte der Szenarien 2a, 2b und 2c

Berlin	Hamburg	München	Köln
Frankfurt a. M.	Stuttgart	Düsseldorf	Dortmund
Essen	Leipzig	Bremen	Dresden
Hannover <sup>1</sup>	Nürnberg	Duisburg	Bochum
Wuppertal	Bielefeld	Bonn	Münster
Karlsruhe	Mannheim	Augsburg	Wiesbaden
Gelsenkirchen	Mönchengladbach	Braunschweig	Kiel
Chemnitz	Aachen <sup>2</sup>	Magdeburg	Halle (Saale)
Krefeld	Freiburg i. B.	Lübeck	Oberhausen
Erfurt	Mainz	Rostock	Kassel
Hagen	Saarbrücken <sup>3</sup>	Hamm	Potsdam
Mülheim a. d. Ruhr	Oldenburg	Ludwigshafen a. R.	Osnabrück
Leverkusen	Solingen	Darmstadt	Herne
Heidelberg	Neuss <sup>4</sup>	Paderborn <sup>5</sup>	Regensburg
Ingolstadt	Würzburg	Fürth	Offenbach a. M.
Wolfsburg	Ulm	Heilbronn	Pforzheim
Göttingen <sup>6</sup>	Bottrop	Trier	Reutlingen <sup>7</sup>
Recklinghausen <sup>8</sup>	Bremerhaven	Koblenz	Bergisch Gladbach <sup>9</sup>
Remscheid	Jena	Erlangen	Moers <sup>10</sup>
Salzgitter	Siegen <sup>11</sup>	Hildesheim <sup>12</sup>	Cottbus

<sup>1</sup> repräsentiert durch die Region Hannover mit etwa 1,1 Mio. Einwohnern<sup>2</sup> repräsentiert durch die Städtereion Aachen mit etwa 550 000 Einwohnern<sup>3</sup> repräsentiert durch den Regionalverband Saarbrücken mit etwa 330 000 Einwohnern<sup>4</sup> repräsentiert durch den Rhein-Kreis Neuss mit etwa 450 000 Einwohnern<sup>5</sup> repräsentiert durch den Kreis Paderborn mit etwa 300 000 Einwohnern<sup>6</sup> repräsentiert durch den Landkreis Göttingen mit etwa 330 000 Einwohnern<sup>7</sup> repräsentiert durch den Landkreis Reutlingen mit etwa 280 000 Einwohnern<sup>8</sup> repräsentiert durch den Kreis Recklinghausen mit etwa 610 000 Einwohnern<sup>9</sup> repräsentiert durch den Rheinisch-Bergischen Kreis mit etwa 280 000 Einwohnern<sup>10</sup> repräsentiert durch den Kreis Wesel mit etwa 460 000 Einwohnern<sup>11</sup> repräsentiert durch den Kreis Siegen-Wittgenstein mit etwa 280 000 Einwohnern<sup>12</sup> repräsentiert durch den Kreis Hildesheim mit etwa 280 000 Einwohnern

## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

Wegen der im Vergleich zu den vorherigen Szenarien höheren Anzahl an Städten, wird die Berechnungsdauer dadurch begrenzt, dass Fernstraßenanschlusskombinationen bereits bei 50 % Übereinstimmung hinsichtlich der entsprechenden HRS-Listen vereint werden. In Szenario 2c gilt ein Grenzwert von 40 % Übereinstimmung. Die Anzahl der Entscheidungsvariablen im ersten Optimierungsschritt beträgt zwölf, da sechs HRS mit je zwei Koordinaten positioniert werden. Die gewählte Populationsgröße beträgt 600 bei 60 Generationen. Im zweiten Optimierungsschritt werden fünf Entscheidungsvariablen verwendet, da gegenüber den vorherigen Szenarien Busse als Flottentyp entfallen. Als Populationsgröße wird 600 und als maximale Generationenzahl 60 gewählt. Die Anzahl an Entscheidungsvariablen im dritten Optimierungsschritt hängt von der Anzahl der betrachteten Städte ab und beträgt in diesen Szenarien 240. Dieser vergleichsweise hohen Anzahl wird Rechnung getragen, indem eine größere Population von 1000 Individuen bei 100 Generationen gewählt wird.

Die Szenarien 2a, 2b und 2c unterscheiden sich hinsichtlich der angenommenen, bestehenden HRS. Während Szenario 2a analog Szenario 1a von allen existierenden und geplanten HRS ausgeht (71), werden in Szenario 2b nur die bestehenden, nicht aber die geplanten HRS vorgesehen (39). Für Szenario 2c werden überhaupt keine HRS angenommen. Mit diesem Szenario kann untersucht werden, wie ein vollständig auf Basis des hier vorgestellten Ansatzes geplantes HRS-Netzwerk aussieht. Abbildung 6.5 zeigt die betrachteten Städte sowie die angenommenen, bestehenden HRS.

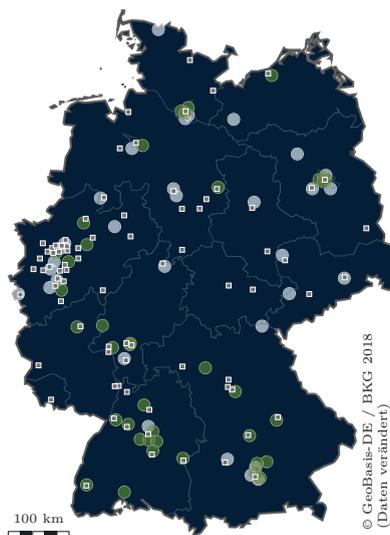


Abbildung 6.5.: Betrachtete Städte (Quadrate) und angenommene, bestehende HRS (Kreise). Szenario 2a: weiß und grün, 2b: grün, 2c: keine

Tabelle 6.3 gibt einen Überblick über alle Szenarien und ihre Parameter.

Tabelle 6.3.: Szenarienübersicht

Parameter	Szenarien				
	1a	1b	2a	2b	2c
Betrachtungsgebiet	Deutschland				
HRS-Zubaugebiet	Neue Bundesländer		Deutschland		
Betrachtete Städte	12		80		
Flottentypen	Bus, Taxi, Carsharing		Taxi, Carsharing		
Fahrzeuganzahl	Status Quo		Annahme		
Bestand an HRS	71	66	71	39	0

## 6.3. Ergebnisse

Für jeden der drei Schritte zur Optimierung eines HRS-Netzwerks für Flotten werden im Folgenden die Ergebnisse gezeigt und diskutiert. In Kapitel 6.3.1 werden die Ergebnisse der Positionsoptimierung von HRS in Städten gezeigt. Da die Anzahl der Fälle, für die HRS-Positionen bestimmt werden, sehr hoch ist, erfolgt die Diskussion anhand der Städte Berlin (3,6 Mio. Einwohner), Köln (1,1 Mio. Einwohner) und Dresden (0,5 Mio. Einwohner). Diese Städte werden gewählt, da sie verschiedene Größenklassen darstellen. Die für jede Stadt mittels Optimierung ausgewählten Kombinationen aus HRS-Anzahl und Flottengröße werden in Kapitel 6.3.2 gezeigt. Das Gesamtergebnis für das jeweilige Betrachtungsgebiet wird in Kapitel 6.3.3 für jedes Szenario vorgestellt.

### 6.3.1. Optimale Tankstellenpositionen

Der erste Optimierungsschritt positioniert HRS in einer Stadt so, dass die Anzahl der im Einzugsgebiet einer HRS lebenden Personen maximal wird. Diese Optimierung wird für jede Stadt und jede Kombination aus HRS-Anzahl (Maximum gemäß Szenario), Fernstraßenanschlusskombination (abhängig von der jeweiligen Stadt) und Flottenkombination (Maximum gemäß Szenario) durchgeführt. Dies bedeutet für die Szenarien 1a und 1b eine Gesamtanzahl an Optimierungen von 113 832 und 195 552 und für die Szenarien 2a, 2b und 2c 116 984, 126 616 und 89 992. Die Anzahl der Kombinationen ist für die Szenarien vom Typ a geringer als für die vom Typ b, da gemäß Szenariendefinition die Anzahl der bestehenden HRS größer ist. Liegt eine bestehende

## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

HRS an einer Fernstraße, so gilt diese als angeschlossen und fließt nicht als zusätzliche Randbedingung in die Optimierung ein. Mit jeder entfallenden Fernstraße halbiert sich die Anzahl an zu betrachtenden Kombinationen. In Szenario 2c werden zwar gar keine bestehenden HRS betrachtet, sodass hier die höchste Zahl der erforderlichen Optimierungen erwartet wird. Allerdings werden Fernstraßenanschlusserfordernisse in diesem Szenario bereits bei 40% Überlappung vereint, sodass die Anzahl der Fernstraßenanschlussskombinationen geringer ist. Da nicht die Ergebnisse aller Varianten gezeigt werden können, wird im Folgenden eine Auswahl vorgestellt.

### Szenarien 1a und 1b

Die Städte unterscheiden sich teils deutlich in ihrer Bevölkerungsdichte. Dies schlägt sich in der Anzahl der Einwohner, die mit einer HRS erfasst werden können, nieder (siehe Abbildung 6.6). Berlin hat mit Abstand die höchste Einwohnerdichte, sodass mehr als 200 000 Personen im Einzugsgebiet einer HRS leben können. Darüber hinaus wird deutlich, dass mit zunehmender Anzahl an HRS die erfassten Einwohner je HRS sinken. Dies liegt daran, dass besonders vorteilhafte Standorte rarer werden, je mehr HRS aufgebaut werden. Es lassen sich zudem Unterschiede zwischen Szenario 1a (Abbildung 6.6a) und 1b (Abbildung 6.6b) feststellen. Eine Szenarienübersicht zeigt Tabelle 6.3 auf Seite 127.

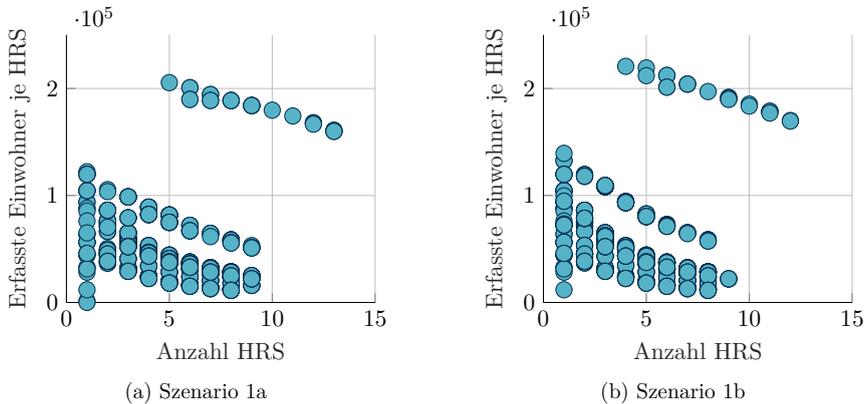


Abbildung 6.6.: Szenarien 1a (links) und 1b (rechts) ohne Fernstraßenanschlusserfordernis: Erfasste Bevölkerung je HRS für verschiedene Kombinationen aus HRS und Flotten

So liegt die Anzahl der erfassten Einwohner je HRS in Szenario 1b tendenziell höher, da hier weniger HRS-Positionen vorab feststehen und so mehr Freiheit bei der Positionierung der übrigen HRS besteht. Darüber hinaus sind einzelne Fälle mit einer sehr geringen Anzahl an erfassten Einwohnern auffällig. In diesen Fällen handelt es sich um bestehende HRS, die am Stadtrand oder an Autobahnauffahrten liegen. Solche

HRS erfüllen somit nicht den Zweck, möglichst viele Personen in ihrem Einzugsgebiet, sondern Transitverkehr zu versorgen.

Die drei verschiedenen Flottentypen stellen unterschiedliche Anforderungen an die HRS-Infrastruktur (siehe Kapitel 4). In Abbildung 6.7 ist für jede Stadt dargestellt, wie viele HRS für den jeweiligen Flottentyp erforderlich sind. Die Städte sind dabei auf der Abszisse entsprechend ihrer Einwohnerzahl aufgetragen. Nicht-ausgefüllte Kreise zeigen an, wie viele HRS bereits zuvor in der jeweiligen Stadt bestanden. In Berlin beispielsweise sind zum Betrieb von Carsharing-Fahrzeugen neun HRS sowohl in Szenario 1a (Abbildung 6.7a) als auch in Szenario 1b (Abbildung 6.7b) erforderlich, während sich die Anzahl der bestehenden HRS unterscheidet. Eine der Städte mit etwa 500 000 Einwohnern erfordert hingegen in Szenario 1a vier und in 1b nur drei HRS. Dies kann damit erklärt werden, dass die in Szenario 1a bestehende HRS durch eine ungünstige Position nicht ausreichend zur geforderten Abdeckung der Bevölkerung beiträgt, sodass in diesem Fall genauso viele zusätzliche HRS vorgesehen werden müssen, wie in Szenario 1b. Zusammen mit der bestehenden HRS ergibt sich so eine höhere Gesamtzahl. Dies lässt sich für alle Flottentypen beobachten, sodass die erforderliche Gesamtanzahl an HRS in Szenario 1b grundsätzlich niedriger als in Szenario 1a ist. Daraus kann man schließen, dass die Positionierung der bestehenden HRS nicht immer geeignet ist, die betrachteten Flottentypen zu versorgen.

In Abbildung 6.8 wird das Optimierungsergebnis der HRS-Positionen am Beispiel von Berlin für den Fall ohne Fernstraßenanschlusserfordernis dargestellt. In Abbildung 6.8a wird zunächst die Bevölkerungsverteilung im Stadtgebiet gezeigt. Die übrigen Teile der Abbildung zeigen die HRS-Positionen für verschiedene Flottenanforderungen. Dabei werden bereits bestehende HRS mit nicht-ausgefüllten und vom Algorithmus positionierte, zusätzliche HRS mit ausgefüllten Kreisen dargestellt, während das Einzugsgebiet jeder HRS mit einem transparenten, hellen Umkreis eingezeichnet ist. Es handelt sich jeweils um die Variante mit der minimal erforderlichen HRS-Anzahl. Man erkennt, dass Taxi- und Carsharing-Flotten unterschiedliche Anforderungen stellen und somit auch zu unterschiedlichen HRS-Positionen führen. Taxistände sind stärker räumlich konzentriert als die Bevölkerung und teils sogar dort gehäuft, wo wenige Menschen leben. Dies kann am Beispiel der in Abbildung 6.8c gezeigten, einzigen zusätzlichen HRS-Position nachvollzogen werden. Die Anforderungen eines Busbetriebs sind vergleichsweise gering, da nur eine HRS im Einzugsgebiet eines Busdepots liegen muss. Trotz fünf bestehenden HRS und sechs Busdepots ist es in Berlin dennoch erforderlich, eine weitere HRS zu positionieren, da keine der HRS geeignet gelegen ist (siehe Abbildung 6.8d).

In Abbildung 6.9 ist Dresden als zweites Beispiel dargestellt. Hier können die Anforderungen von Carsharing- und Taxibetrieb mit derselben HRS-Konfiguration erfüllt werden. Die bestehende HRS liegt knapp außerhalb des Einzugsgebiets eines Busdepots.

6. Auslegung eines  $H_2$ -Initialnetzwerks

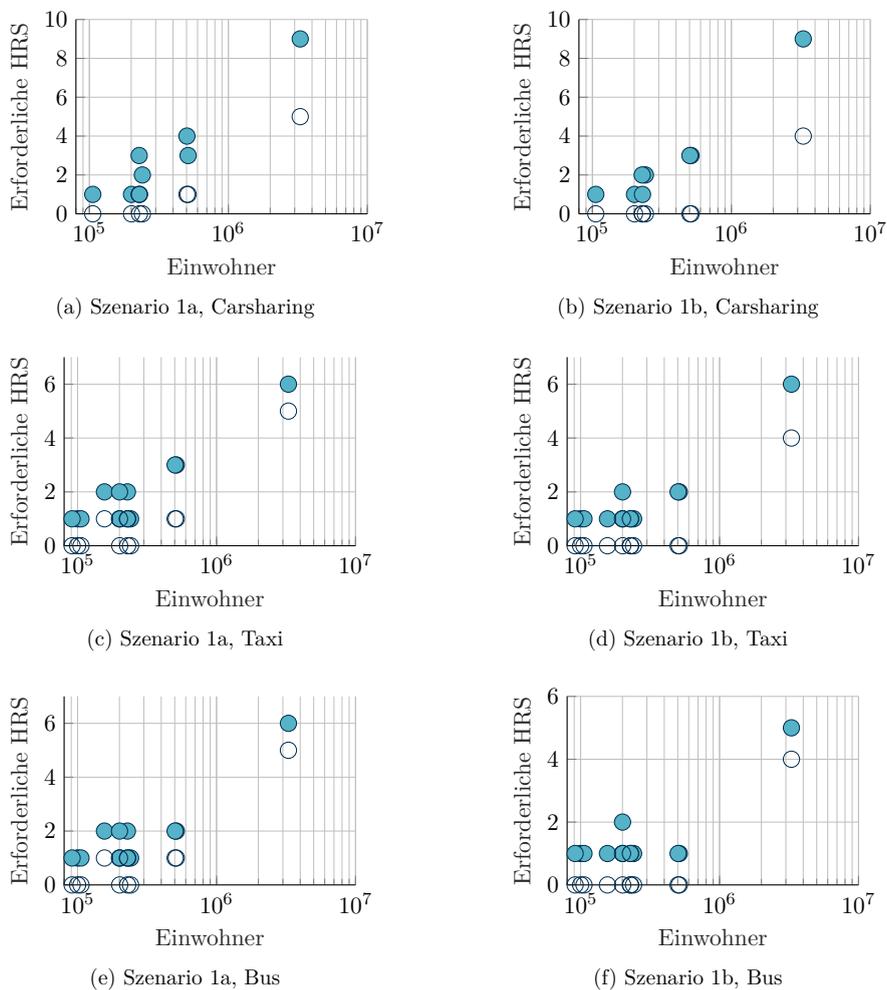


Abbildung 6.7.: Szenarien 1a (links) und 1b (rechts) ohne Fernstraßenanschlusserfordernis: Mindestens erforderliche HRS-Anzahl zum Betrieb von Flotten je Stadt (ausgefüllte Kreise). Nicht-ausgefüllte Kreise zeigen die in der jeweiligen Stadt bestehenden HRS an

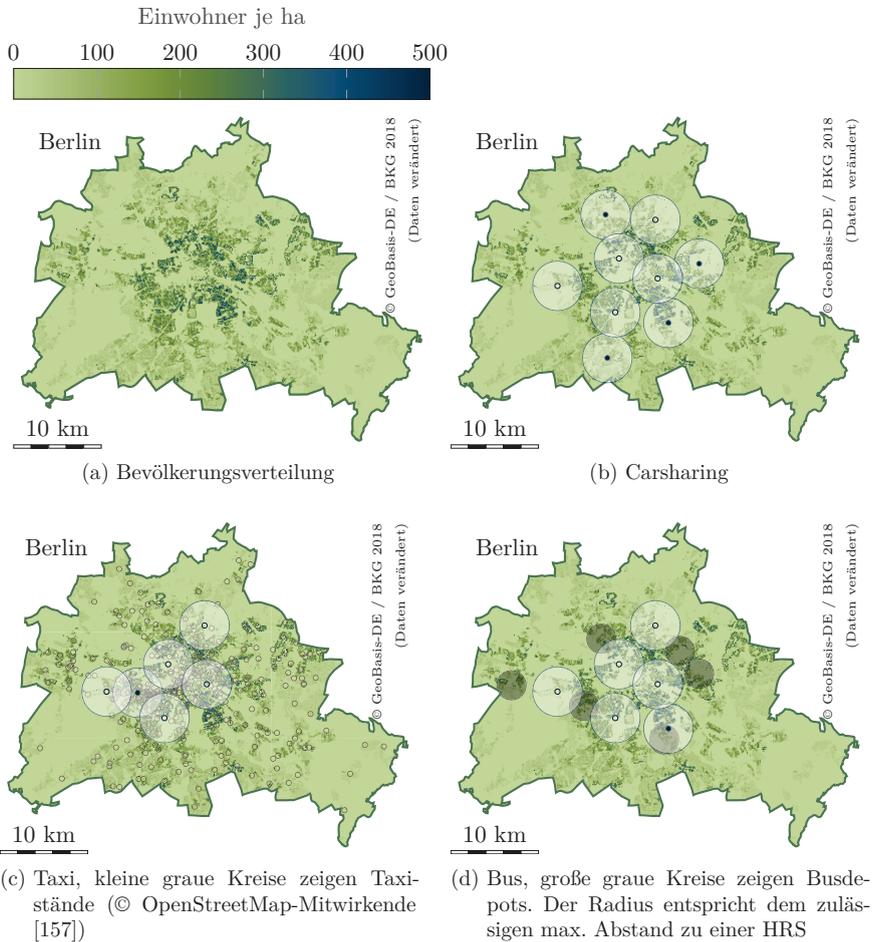


Abbildung 6.8.: Szenario 1a, Berlin: HRS-Positionen für verschiedene Flottenanforderungen. Ausgefüllte blaue Kreise zeigen neue, nicht-ausgefüllte bestehende HRS. Der helle Umkreis entspricht dem Einzugsgebiet. Bevölkerungsdaten aus [155]

## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

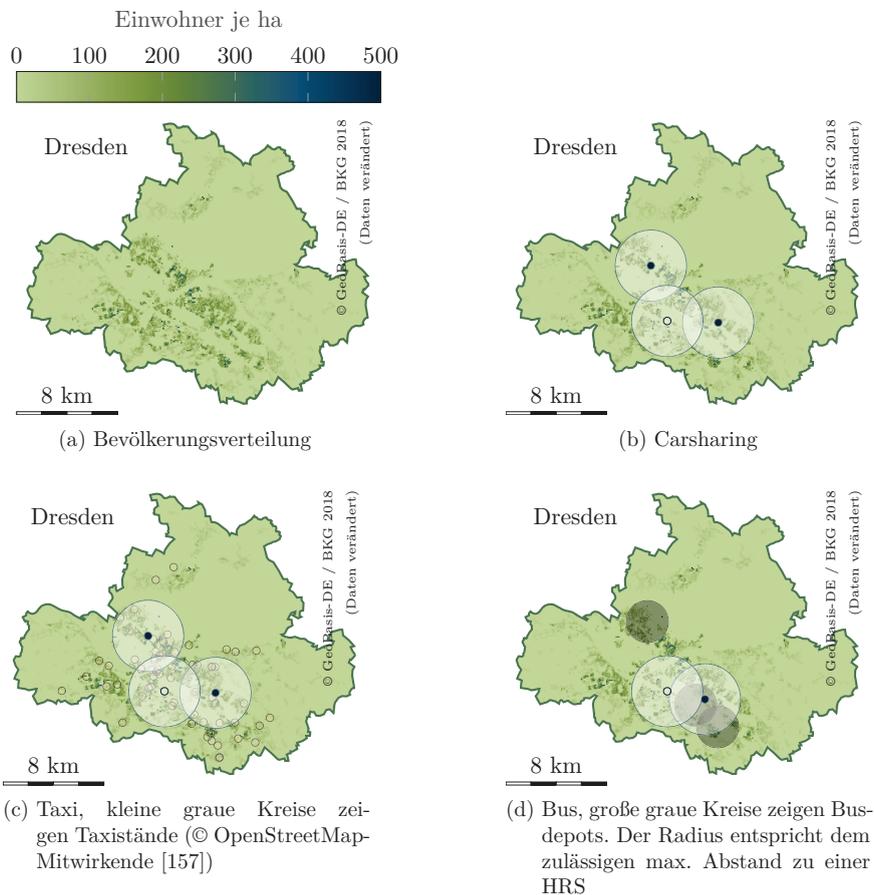


Abbildung 6.9.: Szenario 1a, Dresden: HRS-Positionen für verschiedene Flottenanforderungen. Ausgefüllte blaue Kreise zeigen neue, nicht-ausgefüllte bestehende HRS. Der helle Umkreis entspricht dem Einzugsgebiet. Bevölkerungsdaten aus [155]

### Szenarien 2a, 2b und 2c

Nicht alle Auswertungen, die für die Szenarien 1a und 1b durchgeführt wurden, werden für diese Szenarien wiederholt. Beispielsweise unterscheiden sich die Ergebnisse für die erfassten Einwohner je HRS sowie für die Anzahl der erforderlichen HRS für verschiedene Flottentypen qualitativ nicht von denen der vorherigen Szenarien. Lediglich für einige Städte ist Carsharing mit den in diesen Szenarien angenommenen maximal sechs zusätzlichen HRS nicht möglich. Dies betrifft in Szenarien 2a, 2b und 2c die Region Hannover, den Kreis Siegen-Wittgenstein sowie den Kreis Hildesheim und in Szenarien 2b und 2c zusätzlich den Kreis Recklinghausen. Nur in Szenario 2c betrifft dies außerdem Berlin und Hamburg. Abgesehen von diesen beiden Städten handelt es sich nicht um kreisfreie Städte, sondern um Regionen oder Kreise, die eine größere geographische Ausdehnung aufweisen. Hier ist es entsprechend schwierig, mit wenigen Tankstellen einen ausreichend großen Teil der Bevölkerung abzudecken. Tatsächlich würde vermutlich ein Carsharing-Anbieter nicht den Anspruch erheben, die jeweils gesamte Region beziehungsweise den gesamten Kreis zu erschließen, sondern sich auf die jeweils größte Stadt beschränken. Ein Taxibetrieb hingegen ist in allen Städten möglich, da Taxistände tendenziell stark auf die jeweils größte Stadt konzentriert sind, sodass das Problem für diesen Flottentyp nicht besteht.

Abbildung 6.10 zeigt beispielhaft die HRS-Positionen für Köln unter der Annahme, dass ein Fernstraßenanschluss nicht erforderlich ist und die minimal erforderliche HRS-Anzahl verwendet wird. Da die einzige bestehende HRS außerhalb des Stadtkerns am Flughafen Köln-Bonn liegt, werden drei zusätzliche HRS benötigt, um einen Carsharing-Betrieb zu ermöglichen. Durch die stärkere Konzentration von Taxiständen genügt hier eine zusätzliche HRS. Ein Busbetrieb wird, wie in Kapitel 6.2.2 erläutert, in den Szenarien 2a, 2b und 2c nicht betrachtet.

6. Auslegung eines  $H_2$ -Initialnetzwerks

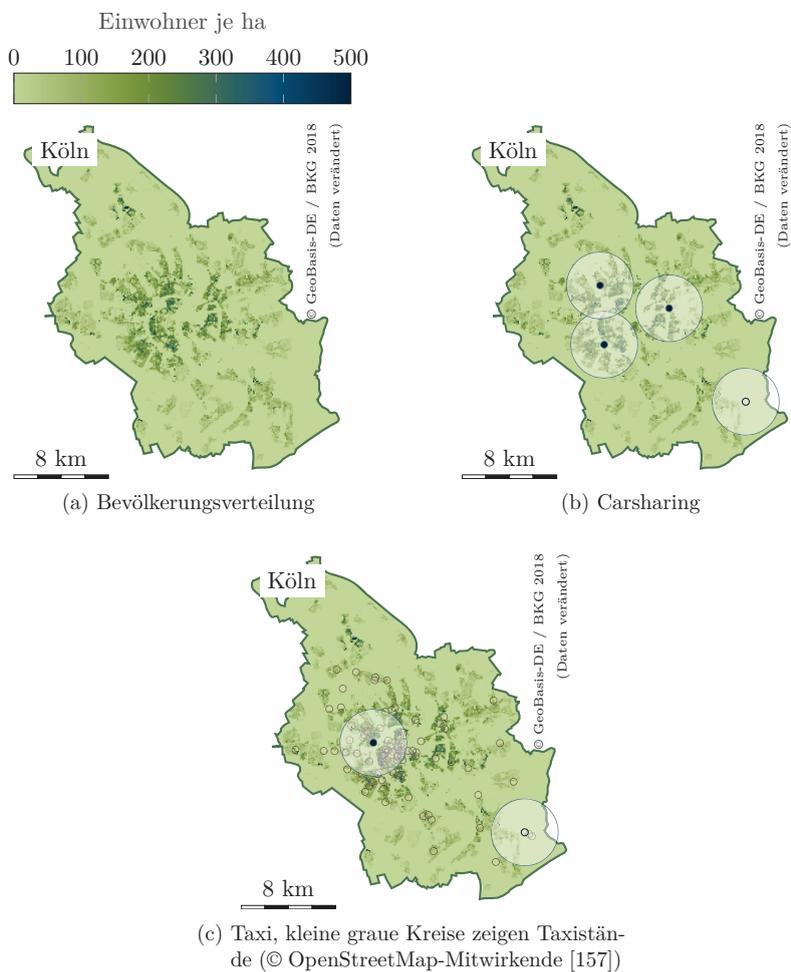


Abbildung 6.10.: Szenario 2a, Köln: HRS-Positionen für verschiedene Flottenanforderungen. Ausgefüllte blaue Kreise zeigen neue, nicht-ausgefüllte bestehende HRS. Der helle Umkreis entspricht dem Einzugsgebiet. Bevölkerungsdaten aus [155]

### 6.3.2. Optimale Flottenkombinationen

Im zweiten Optimierungsschritt werden für jede Stadt die HRS-Anzahl und die Flottengröße gewählt. Dabei werden mehrere dieser Kombinationen identifiziert, die jeweils unterschiedliche Kompromisse hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und der Summe der im Einzugsgebiet einer HRS lebenden Personen darstellen und somit die Pareto-Front bilden. Im Gegensatz zum ersten Optimierungsschritt müssen somit nur noch Varianten für verschiedene Fernstraßenanschlüsse und nicht mehr zusätzlich für jede denkbare Flottenkombination und HRS-Anzahl betrachtet werden. Entsprechend geringer fällt die Anzahl der Varianten aus. In den Szenarien 1a und 1b beträgt sie 1678 und 2828. Je Variante werden jedoch mehrere Lösungen identifiziert (Pareto-Front), sodass die Gesamtzahl der Lösungen 13 722 beziehungsweise 23 705 beträgt. In den Szenarien 2a bis 2c bestehen 4178, 4522 und 3214 Varianten mit insgesamt 23 549, 25 111 und 17 904 Lösungen. Im Folgenden wird eine Auswahl der Pareto-Fronten dargestellt und diskutiert. Dabei werden zur beispielhaften Darstellung ausschließlich die Städte Berlin und Dresden im Szenario 1a herangezogen. Die anderen Szenarien unterscheiden sich in den betrachteten Städten, der maximalen Anzahl zu positionierender HRS und der Randbedingung bestehender HRS. Diese Aspekte haben in diesem Optimierungsschritt jedoch keinen signifikanten Einfluss.

Zur Vorstellung der Ergebnisse findet eine Einschränkung auf Varianten ohne das Erfordernis eines Fernstraßenanschlusses statt. Für die Beispielstädte Berlin und Dresden sind die entsprechenden Pareto-Fronten der Optimierung in Abbildung 6.11 dargestellt. Jede Lösung ist durch einen Punkt gekennzeichnet und ihre Werte für die beiden Optimierungsziele lassen sich auf der Abszisse und Ordinate ablesen. Ideal ist ein Punkt mit einem besonders hohen Wert auf der Abszisse und einem möglichst niedrigen Wert auf der Ordinate. Die Elemente der Pareto-Front stellen jeweils Kompromisse hinsichtlich der beiden Ziele dar. Kein Punkt ist einem anderen überlegen, also hinsichtlich beider Ziele besser. Die jedem Punkt zugeordnete Zahl zeigt die Anzahl der neu hinzugefügten HRS an.

Für Berlin (siehe Abbildung 6.11a) kann im Vergleich mit Dresden (siehe Abbildung 6.11b) mit zunehmender HRS-Anzahl ein nur leicht überproportional steigender Verlauf beobachtet werden. Das bedeutet, dass die Qualität möglicher Standorte im Hinblick auf die Anzahl an Personen im Einzugsgebiet langsamer abnimmt. Dies ist auf die Größe der Stadt zurückzuführen. Für Dresden kann festgestellt werden, dass bei mehr als drei zusätzlichen HRS die mit jeder weiteren HRS zusätzlich versorgte Anzahl an Personen abnimmt, bis mit acht HRS nahezu sämtliche Dresdner im Einzugsgebiet einer HRS leben. Dies lässt sich gut anhand von Abbildung 6.9 nachvollziehen. Darüber hinaus kann abgelesen werden, dass in Berlin etwa 1 Mio. Personen im Einzugsgebiet bestehender HRS leben (null zusätzliche HRS) und in Dresden weniger als 50 000. Die Verluste sind in diesem Fall null, da nur neu zu errichtende HRS, nicht aber bestehende in die Wirtschaftlichkeitsberechnung einfließen. Diese sind Randbedingung und somit nicht Gegenstand der Optimierung.

## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

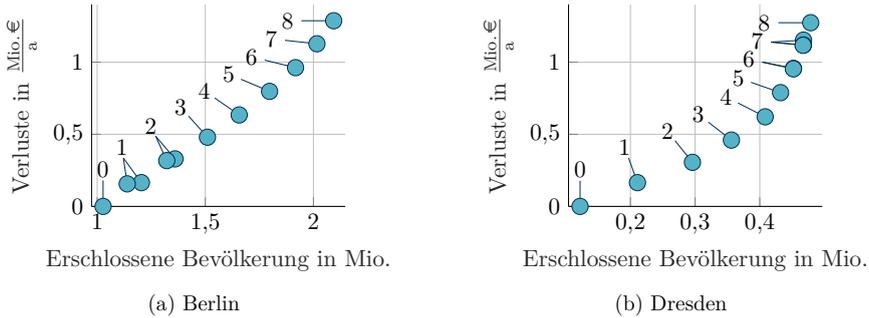
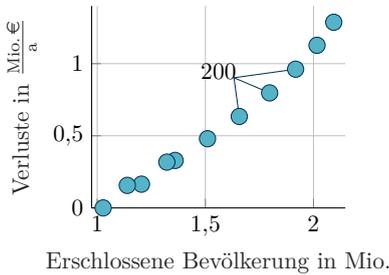


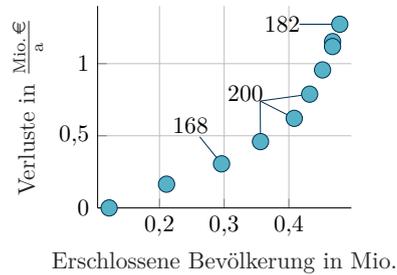
Abbildung 6.11.: Szenario 1a: Pareto-Fronten für Berlin und Dresden. Jeder Punkt steht für eine mögliche Konfiguration aus HRS und Flotten. Die zugeordneten Zahlen zeigen die Anzahl neu hinzugefügter HRS an

Neben der Anzahl an HRS und deren Position sind die Lösungen durch die Flottengrößen gekennzeichnet. Keine der Lösungen weist eine Busflotte auf, da — wie in Kapitel 5 gezeigt — HRS für Busse nachteilig gegenüber alternativen Auslegungen sind. Die Anzahl der Taxis und Carsharing-Fahrzeuge je Lösung ist in Abbildung 6.12 gezeigt. So weist die Lösung mit dem höchsten Versorgungsgrad der Bevölkerung in Berlin beispielsweise 100 Taxis (siehe Abbildung 6.12c) und keine Carsharing-Fahrzeuge (siehe Abbildung 6.12a) auf. In Dresden weist die Lösung mit dem höchsten Versorgungsgrad der Bevölkerung zum Beispiel 94 Taxis (siehe Abbildung 6.12d) und 182 Carsharing-Fahrzeuge (siehe Abbildung 6.12b) auf. Da in Berlin für einen Carsharing-Betrieb mindestens vier zusätzliche HRS erforderlich sind (vergleiche Abbildung 6.8b), weist keine der Lösungen mit weniger HRS (vergleiche Abbildung 6.11a) Carsharing-Fahrzeuge auf. Gleiches gilt für Dresden bei weniger als zwei zusätzlichen HRS. Der Verlauf der Anzahl der Carsharing-Fahrzeuge über der Pareto-Front ist für Berlin auffällig, da zunächst für drei Lösungen die maximal zulässige Fahrzeugzahl gewählt wird und für die letzten beiden Lösungen (mit dem höchsten und dem zweithöchsten Versorgungsgrad der Bevölkerung) keine Fahrzeuge vorgesehen werden. Dies lässt sich damit erklären, dass die Fahrzeuge auf eine verhältnismäßig große Zahl an HRS verteilt werden. Fünf HRS bestehen bereits und vier weitere sind mindestens nötig, um eine für den Carsharing-Betrieb erforderliche Bevölkerungsabdeckung mit HRS zu erreichen. Würden alle Fahrzeuge gleichmäßig auf die HRS verteilt, so wären jeder HRS also etwa 22 Fahrzeuge zugewiesen. In Abbildung 5.8 ist gezeigt, dass sich die Wirtschaftlichkeit bei Flottengrößen zwischen 20 und 50 Fahrzeugen verbessert, folglich ist eine möglichst große Flotte sinnvoll. Bei nur zehn Fahrzeugen je HRS ist die Wirtschaftlichkeit jedoch geringer als im Fall ohne Flotten. Deshalb wird im Falle von zwölf oder mehr HRS eine Konfiguration ohne Carsharing-Fahrzeuge gewählt. Die ermittelten Flottenkonfigurationen stellen daher ein Optimum dar, das abhängig von der Situation in der jeweiligen Stadt hinsichtlich HRS-Positionen und -Bestand ist.

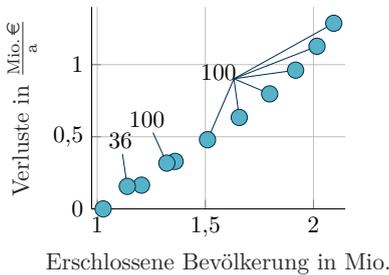
Die meisten Konfigurationen in Berlin weisen eine Taxiflotte mit 100 Fahrzeugen auf. Dennoch gibt es, abgesehen von der Konfiguration ohne zusätzliche HRS, zwei Fälle ganz ohne Flottenfahrzeuge. Diese ähneln hinsichtlich der Optimierungsziele jeweils einer benachbarten Konfiguration mit Taxis. Dadurch, dass keine Flotten gewählt werden, steigen die Verluste leicht an. Gleichzeitig besteht eine größere Freiheit in der Positionierung der HRS, da keine durch Flotten bedingten Randbedingungen eingehalten werden müssen. So kann die Anzahl der versorgten Personen leicht erhöht werden. Dieser Kompromiss ist in diesen Fällen vergleichsweise gut, da die Verluste sich nur marginal erhöhen, die Anzahl versorgter Personen aber deutlicher steigt. Einen ähnlichen Fall gibt es auch in Dresden für sieben zusätzliche HRS. Die Konfiguration ohne Flotten stellt dabei einen vergleichsweise ungünstigen Kompromiss dar, da sich die Verluste deutlich erhöhen, die Anzahl versorgter Personen aber nur marginal steigt.



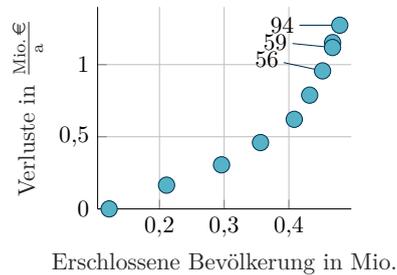
(a) Berlin, zugeordnete Zahlen zeigen Carsharing-Fahrzeuge an



(b) Dresden, zugeordnete Zahlen zeigen Carsharing-Fahrzeuge an



(c) Berlin, zugeordnete Zahlen zeigen Taxis an



(d) Dresden, zugeordnete Zahlen zeigen Taxis an

Abbildung 6.12.: Szenario 1a: Pareto-Fronten für Berlin und Dresden. Jeder Punkt steht für eine mögliche Konfiguration aus HRS und Flotten. Die den Punkten zugeordneten Zahlen zeigen die Anzahl der Flottenfahrzeuge an, sofern sie größer null ist

### 6.3.3. Optimales Gesamtnetzwerk aus HRS und Flotten

Im dritten und letzten Optimierungsschritt werden alle vorher erzielten Teilergebnisse verwendet, um ein optimales Gesamtnetzwerk aus HRS und Flotten für das jeweilige Betrachtungsgebiet zu bestimmen. Folglich ist je Szenario nur noch ein Optimierungsvorgang erforderlich, dessen Ergebnis nicht in einer Lösung, sondern in einer Vielzahl von Lösungen besteht. Diese stellen jeweils unterschiedliche Kompromisse hinsichtlich der beiden Optimierungsziele (geringe Verluste und große Anzahl versorgter Personen) dar und bilden die Pareto-Front. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Szenarien vorgestellt, verglichen und diskutiert.

#### Szenario 1a und 1b

Die Pareto-Front von Szenario 1a ist in Abbildung 6.13a gezeigt. Auf der Abszisse ist dargestellt, wie vielen Personen das jeweilige HRS-Netzwerk den Umstieg auf ein FCEV nach den zuvor definierten Kriterien ermöglicht. Die Ordinate zeigt die mit Errichtung und Betrieb der HRS verbundenen jährlichen Verluste. Es kann festgestellt werden, dass das bestehende HRS-Netzwerk etwa 1,2 Mio. Personen den Umstieg ermöglicht. Diese Angabe bezieht sich auf die räumliche Verfügbarkeit von HRS und nicht auf deren Kapazität. In Szenario 1a umfasst das Netzwerk die Ende 2017 bestehenden und zu diesem Zeitpunkt geplanten HRS. Die Abbildung zeigt, mit welchen jährlichen Verlusten die Versorgung weiterer Teile der Bevölkerung jeweils verbunden sind. Soll beispielsweise weiteren 2,8 Mio. Personen, also insgesamt 4 Mio. Personen der Umstieg auf ein FCEV ermöglicht werden, so gehen damit jährliche Verluste in Höhe von 3 Mio. € einher. Darin enthalten sind die Kosten für Aufbau und Betrieb der HRS inklusive zugehöriger WEA sowie Strombezugskosten (siehe Kapitel 5). Diese spezifischen Verluste steigen umso stärker an, je mehr Personen versorgt werden sollen. Maximal können etwa 3,6 Mio. Personen durch den Aufbau von HRS in den betrachteten zwölf Städten zusätzlich versorgt werden, insgesamt also knapp 4,8 Mio. Personen. Es ist bemerkenswert, dass die Pareto-Front zu Beginn eine verhältnismäßig hohe Steigung aufweist, um dann zunächst auf einem Plateau zu verharren. Dies bedeutet, dass es für diesen Bereich mehrere Lösungen gibt, die sehr ähnlich hinsichtlich der Verluste sind, aber einen signifikanten Unterschied in der versorgten Bevölkerung ausmachen. In Abbildung 6.13b wird deutlich, dass die Verluste nahezu direkt proportional zur Anzahl der für die jeweilige Abdeckung erforderlichen HRS sind. Es werden höchstens 55 HRS errichtet. Im Optimierungsprozess werden bis zu 96 HRS zugelassen, aber der Aufbau weiterer HRS bringt folglich keine oder so geringe Vorteile, dass der Optimierungsalgorithmus derartige Konfigurationen in der vorgegebenen Optimierungsdauer nicht findet.

Jeder Punkt der Pareto-Front ist durch die Anzahl und Position von HRS in den betrachteten Städten sowie die Flottengrößen gekennzeichnet. Abbildung 6.13c stellt die Flottengrößen in der Summe über alle betrachteten Städte dar. Busse sind nicht Teil

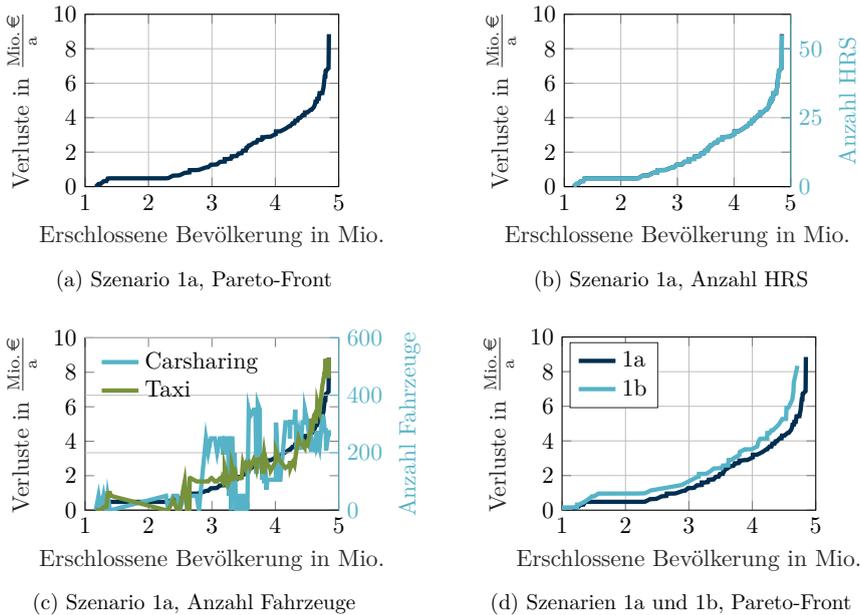


Abbildung 6.13.: Szenarien 1a und 1b: Pareto-Fronten, Anzahlen HRS und Fahrzeuge

der optimalen Lösungen. Die Größe der Carsharing-Flotte schwankt teils in oszillierender Weise über den Verlauf der Pareto-Front. Das oszillierende Verhalten kann damit erklärt werden, dass durch den Einsatz von Flotten Restriktionen hinsichtlich der HRS-Positionierung bestehen. Soll nun die Anzahl der im Einzugsgebiet einer HRS lebenden Personen erhöht werden, kann eine vorteilhaftere Positionierung dadurch ermöglicht werden, dass kein Flottenbetrieb vorgesehen wird. Da dadurch die Verluste ansteigen, ergibt sich ein alternativer Punkt auf der Pareto-Front. Daraus lässt sich darüber hinaus ableiten, dass der Einfluss der Flotten auf die Verluste insgesamt zwar eindeutig aber nicht so bedeutend ist, dass nur Lösungen mit Flotten geeignete Kompromisse hinsichtlich der beiden Ziele darstellen. Der Effekt der oszillierenden Flottengröße tritt bei Carsharing-Fahrzeugen in stärkerem Maße als bei Taxis auf, da die Anforderungen eines Carsharing-Betriebs hinsichtlich der HRS-Positionierung im Allgemeinen größer sind (siehe Kapitel 6.3.1 und beispielhaft Abbildung 6.8).

Im Gegensatz zu Szenario 1a sieht Szenario 1b eine geringere Zahl an bestehenden HRS vor. Die Auswirkungen auf die Pareto-Front im Vergleich zu Szenario 1a können in Abbildung 6.13d beobachtet werden. Ohne den Aufbau zusätzlicher HRS gelten etwa 1 Mio. Personen als versorgt.

Informationen zur HRS-Anzahl und Flottengröße sind in Abbildung 6.14 für Szenario

## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

rio 1a städteweise dargestellt. Die Abszisse stellt unverändert gegenüber der vorherigen Abbildung die versorgte Bevölkerung dar, sodass die Darstellung zur vorherigen Pareto-Front kongruent ist. Die Eigenschaften eines Elements der Pareto-Front lassen sich in dieser Darstellung als Spalte ablesen. Bezüglich der HRS-Anzahl (siehe Abbildung 6.14a) ergibt sich für die Städte ein im Allgemeinen unterschiedliches Bild. Es ist bemerkenswert, dass zuerst in Halle (Saale), Jena und Rostock HRS vorgesehen werden, während die deutlich größeren Städte Berlin, Dresden und Leipzig erst spät im Verlauf der Pareto-Front HRS erhalten. Dies verdeutlicht, dass die Priorisierung der Städte nicht antizipiert werden kann, da sowohl die Bevölkerungsdichte als auch der Bestand an HRS und die geographische Bedeutung für das HRS-Netzwerk eine Rolle spielen. Es ist auffällig, dass der Verlauf in vielen Städten kontinuierlich ist. Nur einige Städte sind bei Konfigurationen für höhere Versorgungsgrade der Bevölkerung nicht mehr Teil des HRS-Netzwerks, die es bei Konfigurationen geringerer Abdeckung noch gewesen sind. Eine dieser Ausnahmen stellt Rostock dar. Diese Stadt ist zu Beginn des zuvor beschriebenen Plateaus bei etwa 1,3 Mio. versorgten Personen noch Teil des HRS-Netzwerks. Eine alternative, fast äquivalente (vergleiche Abbildung 6.13a) Lösung für etwa 2 Mio. versorgte Personen ist der Aufbau von HRS in Dresden und Halle (Saale).

Die Flottengrößen spiegeln tendenziell die zuvor diskutierten Ergebnisse wider. So kann die zuvor beobachtete Schwankung der Carsharing-Flottengröße hier städteweise nachvollzogen werden. Auffällig ist, dass die Schwankungen zumeist nicht kontinuierlich stattfinden, sondern entweder eine große Flotte oder gar keine vorgesehen wird. Dies ist plausibel, da die durch Flotten induzierte Randbedingung zur HRS-Positionierung nur entfällt, wenn keine Fahrzeuge des jeweiligen Flottentyps vorgesehen werden. Für Berlin entfällt Carsharing gänzlich, wenn die Anzahl an HRS zu groß wird, da in diesem Fall die Anzahl der Carsharing-Fahrzeuge je HRS zu gering und diese Variante wirtschaftlich unattraktiv wird (vergleiche Abbildung 6.12a). Bei Varianten mit einer geringen Zahl an HRS kann in einigen Städten nicht die für einen Carsharing-Betrieb erforderliche Abdeckung erreicht werden, sodass Carsharing keine Option ist. Auch für Taxis kann eine Schwankung beobachtet werden.

Im Folgenden werden einzelne Punkte der Pareto-Front hinsichtlich des HRS-Netzwerks betrachtet. In Abbildung 6.15 sind die beispielhaft ausgewählten Punkte und ihre jeweilige Entsprechung im HRS-Netzwerk gezeigt. Ausgefüllte, weiße Kreise zeigen dabei neu vorgesehene HRS an, transparente, weiße Kreise zeigen bestehende HRS. Die Radien der Kreise sind zur besseren Sichtbarkeit unabhängig vom Einzugsgebiet der HRS gewählt. Verkehrsströme, die durch die neu errichteten HRS ermöglicht werden, sind als Linien dargestellt. Es werde nur Fernfahrten mit einer Streckenlänge von mehr als der halben Fahrzeugreichweite dargestellt. Außerdem werden Routen nur berücksichtigt, wenn den Menschen am Ursprungsort der Umstieg auf ein FCEV ermöglicht wird, also mindestens 75 % aller Fernfahrten möglich sind. Diese Verkehrsströme ergeben sich aus den Fahrten, die zwischen den jeweiligen Städten pro Jahr unternommen werden, skaliert mit dem Anteil der in der Ursprungsstadt im Einzugsgebiet einer HRS lebenden Personen. Es wird zwischen zwei verschiedenen Arten von

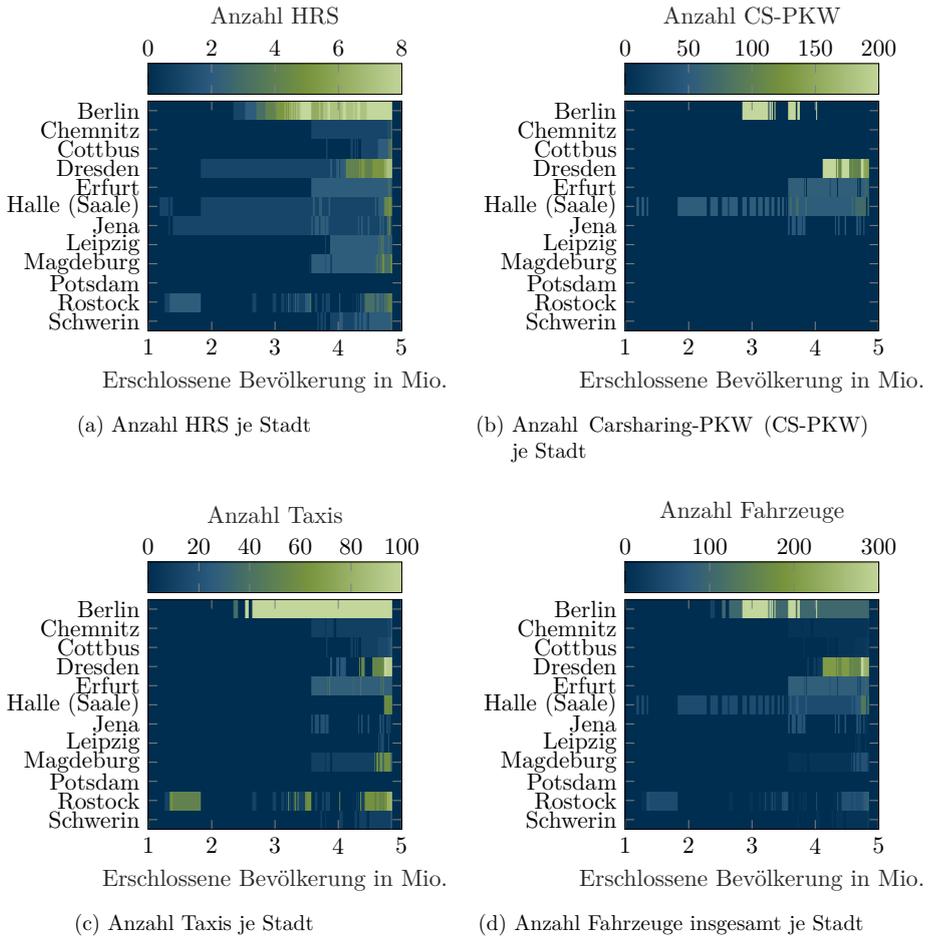


Abbildung 6.14.: Szenario 1a: Eigenschaften der Pareto-Front

ermöglichten Verkehrsströmen unterschieden. In Weiß werden diejenigen dargestellt, deren Routenverbindung durch die neuen HRS überhaupt erst möglich werden. Grüne Linien bedeuten, dass die entsprechende Route zwar auch schon zuvor möglich war, durch die neuen HRS in der Ursprungstadt nun aber überhaupt erstmals oder mehr Personen im Einzugsgebiet einer HRS leben und diese Route nutzen können. Der Verlauf der Linien entspricht den tatsächlichen Fahrtrouten. Die Opazität der Linien quantifiziert den jeweiligen Verkehrsstrom. Eine vollkommen opake Linie steht für 500 000 oder mehr Fahrten pro Jahr.

## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

Ein HRS-Netzwerk, das 2,3 Mio. Personen den Umstieg auf ein FCEV ermöglicht, ist in Abbildung 6.15a dargestellt und beinhaltet den Aufbau von drei zusätzlichen HRS in Jena, Dresden und Halle (Saale). Dadurch werden beispielsweise Fahrten von Berlin über Jena nach Hessen möglich. Insbesondere ermöglicht diese HRS-Positionierung für Berlin nun mehr als 75 % der Fernfahrten mit FCEV. Dadurch gelten nun alle in Berlin im Einzugsgebiet einer HRS lebenden Personen als versorgt. Entsprechend sind die den Berlinern zusätzlich ermöglichten Routen ebenfalls eingefärbt, auch wenn sie nicht an den neu hinzugefügten HRS liegen. So erklärt sich auch, dass diese Konfiguration hinsichtlich der versorgten Bevölkerung viel vorteilhafter ist als andere Konfigurationen mit drei HRS, die zu ähnlichen Verlusten führen. Diese Konfiguration liegt deshalb am Ende des zuvor beschriebenen Plateaus der Pareto-Front. Abbildung 6.15b zeigt ein erweitertes HRS-Netzwerk mit zusätzlichen HRS in Rostock und Berlin. Mit diesem HRS-Netzwerk gelten etwa 3,5 Mio. Personen als versorgt. Man erkennt, dass gegenüber dem zuvor dargestellten Fall kaum zusätzliche Routen neu ermöglicht werden und die bestehenden Routen nun stärker genutzt werden. Der dritte, in Abbildung 6.15c gezeigte Fall stellt ein stark ausgebautes HRS-Netzwerk dar, das etwa 4,5 Mio. Personen versorgen kann. Neben weiteren HRS in den bereits zuvor versorgten Städten befinden sich nun zusätzliche HRS in Leipzig, Chemnitz, Cottbus, Magdeburg und Schwerin. Im Vergleich zu den anderen Fällen werden einige Routen neu ermöglicht, beispielsweise von Dresden nach München.

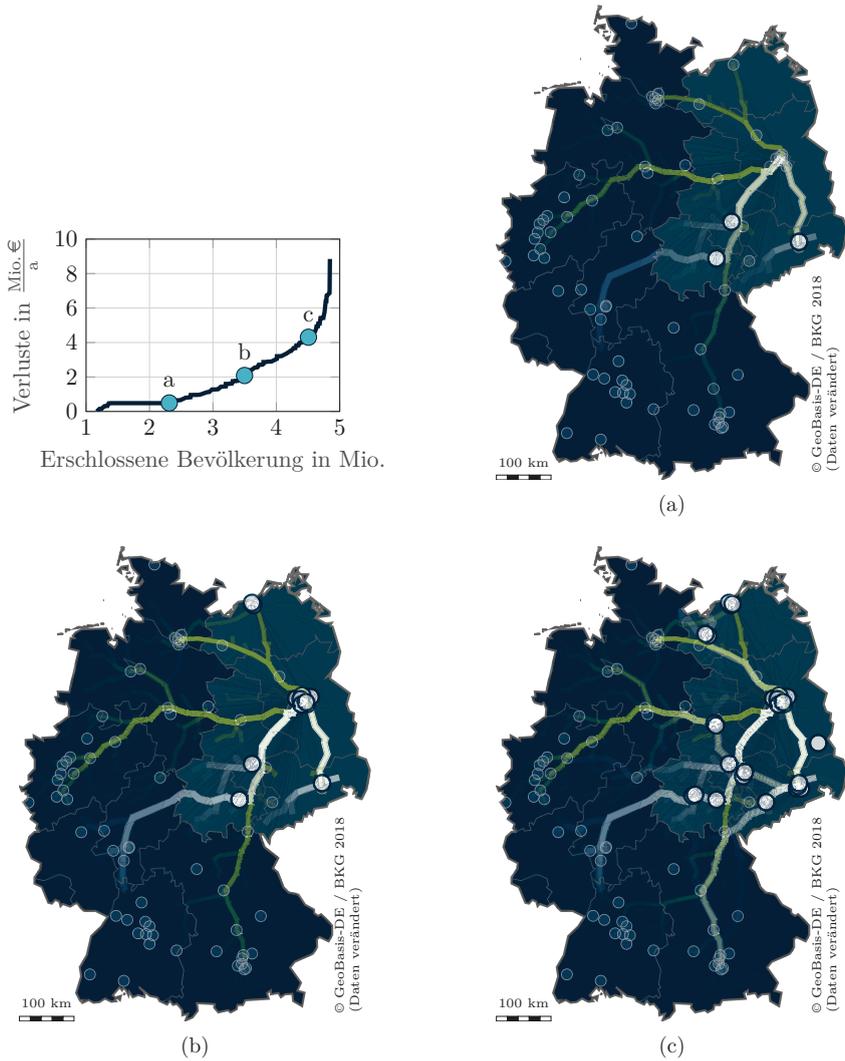


Abbildung 6.15.: Szenario 1a: HRS-Netzwerk für ausgewählte Punkte der Pareto-Front. Ausgefüllte Kreise stehen für zusätzlich vorgesehene HRS, transparente Kreise für bestehende HRS. Linien zeigen zusätzlich ermöglichte Verkehrsströme. Linien sind weiß, wenn die Route mit den neuen HRS erstmals möglich wird

### Szenarien 2a, 2b und 2c

Szenario 2a unterscheidet sich von Szenario 1a dadurch, dass HRS in 80 Städten des gesamten Bundesgebiets aufgebaut werden können. Die Pareto-Front und die Eigenschaften ihrer Elemente zeigen in Abbildung 6.16 ein qualitativ ähnliches Verhalten wie in Szenario 1a. Für den Fall, dass keine zusätzlichen HRS aufgebaut werden, entsteht folglich auch kein Verlust. Die Anzahl der Personen, denen das bestehende HRS-Netzwerk einen Umstieg auf FCEV erlaubt, ist mit etwa 1,2 Mio. identisch zu Szenario 1a, da die Ausgangssituation die gleiche ist (vergleiche Abbildungen 6.13a und Abbildung 6.16a). Der Verlauf der Verluste über der versorgten Bevölkerung ist jedoch flacher als in Szenario 1a. Soll beispielsweise insgesamt 4 Mio. Personen der Umstieg auf ein FCEV ermöglicht werden, so geht dies in Szenario 2a mit einem jährlichen Verlust für Aufbau und Betrieb der Infrastruktur in Höhe von etwa 1,7 Mio. € einher, während in Szenario 1a jährlich 3,0 Mio. € Verlust entstehen. Dieser Unterschied ist plausibel, da in Szenario 2a mehr besonders vorteilhafte HRS-Standorte zur Verfügung stehen und so die gleiche Anzahl an Personen mit weniger HRS versorgt werden kann. Zudem kann das Netzwerk an mehr geographischen Orten aufgewertet werden, um für Städte mit bestehender HRS einen ausreichend hohen Anteil an Fernfahrten zu ermöglichen. Mit den bestehenden HRS und dem Aufbau von HRS in den betrachteten Städten können insgesamt maximal 17,5 Mio. Personen bei jährlichen Verlusten von etwa 34,5 Mio. € versorgt werden. In diesem Fall werden 218 zusätzliche HRS errichtet (siehe Abbildung 6.16b). Nahezu alle Elemente der Pareto-Front sehen Flottenfahrzeuge vor (siehe Abbildung 6.16c). Aus den bereits diskutierten Gründen oszilliert insbesondere der Verlauf der Anzahl der Carsharing-Fahrzeuge. Die Amplitude der Schwankung ist relativ geringer als in Szenario 1a, da deutlich mehr Städte betrachtet werden und sich Schwankungen der Flottengröße in den Städten teilweise ausgleichen. Zudem ist in diesem Szenario grundsätzlich der Einsatz von Carsharing-Fahrzeugen möglich, während in den Szenarien 1a und 1b der Einsatz auf Städte beschränkt war, die auch heute schon Carsharing-Fahrzeuge aufweisen. In Abbildung 6.16d sind die Pareto-Fronten der Szenarien 2a, 2b und 2c verglichen. In Szenario 2b werden weniger bestehende HRS und in Szenario 2c gar keine bestehenden HRS angenommen. Erwartungsgemäß kann in diesen Szenarien bei jeweils gleichen Verlusten weniger Bevölkerung versorgt werden. Bei beispielsweise jährlichen Verlusten von 10 Mio. € wird in den Szenarien 2a und 2b 10,5 Mio. beziehungsweise 7,0 Mio. und im Szenario 2c 4,7 Mio. Personen der Umstieg auf ein FCEV ermöglicht. Werden in Szenario 2b gar keine zusätzlichen HRS aufgebaut, genügt das bestehende HRS-Netzwerk nicht, um Menschen den Umstieg auf ein FCEV zu ermöglichen, da aus keiner der Städte mindestens 75 % der Fernfahrten möglich sind. Gleiches gilt für Szenario 2c, da hier gar kein HRS-Netzwerk besteht. Es müssen mindestens 21 HRS errichtet werden, die mit einem jährlichen Verlust von 3,3 Mio. € einhergehen, um einem ersten Teil der Bevölkerung (120 000 Personen) die Nutzung eines FCEV zu ermöglichen. Diese 21 HRS sind folglich die Mindestanzahl, ab der man von einem HRS-Netzwerk sprechen kann. In Szenario 2b, das das Ende 2017 existierende HRS-Netzwerk abbildet, befindet man sich hingegen gerade an der Schwelle, ab der mit

dem Aufbau jeder weiteren HRS die versorgte Bevölkerung nahezu linear ansteigt. In Szenario 2c ist verglichen mit Szenario 2b zu Beginn der Pareto-Front eine geringere Gesamtzahl an HRS erforderlich, um die gleiche Bevölkerung zu versorgen. Diese sind jedoch mit höheren Kosten verbunden, da in Szenario 2b ein nennenswerter Anteil der HRS bereits besteht. Der höhere Gesamtbedarf an HRS in Szenario 2b ist plausibel, da der Aufbau des bestehenden HRS-Netzwerks, der diesem Szenario zugrunde liegt, nicht nach den hier angenommenen idealisierten Kriterien vorgenommen wurde und deshalb je HRS weniger Personen versorgt werden. Der Verlauf der Pareto-Fronten von Szenario 2b und 2c zeigt stellenweise Sprünge oder Stufen. Das lässt sich darauf zurückführen, dass mit der Ergänzung einer oder mehrerer HRS bisweilen neue Verbindungen ermöglicht werden, die der Bevölkerung gleich mehrerer Städte den Umstieg auf ein FCEV erlauben.

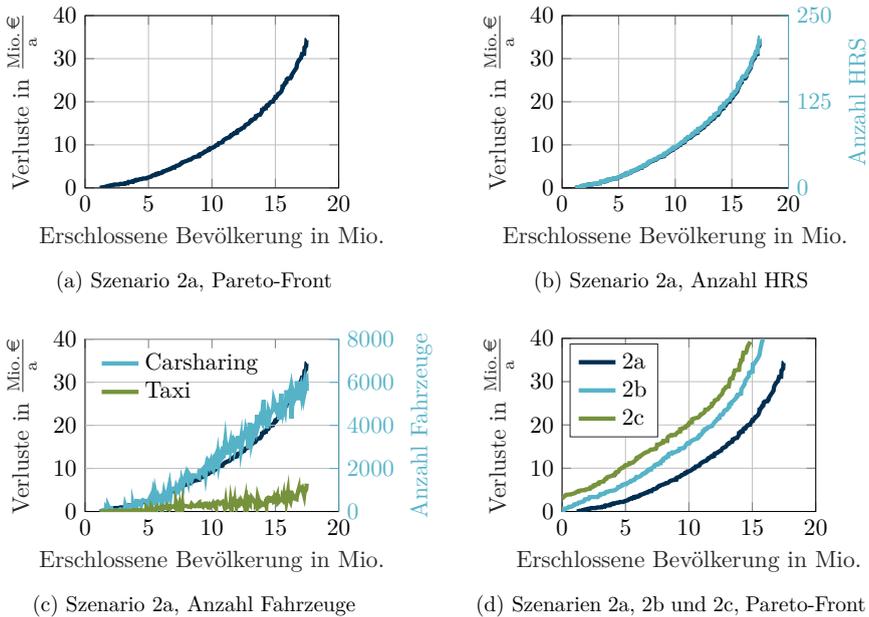


Abbildung 6.16.: Szenarien 2a, 2b und 2c: Pareto-Fronten, Anzahlen HRS und Fahrzeuge

In Abbildung 6.17 ist die Anzahl der zusätzlich vorgesehenen HRS je Stadt entlang der Pareto-Front gezeigt. Einträge einer Spalte gehören jeweils zum gleichen Element der Pareto-Front. Man kann erkennen, dass in einigen Städten nahezu in jedem Fall mindestens eine HRS zugebaut wird. Dies betrifft nicht zwangsläufig nur große Städte. So enthalten die ersten Elemente der Pareto-Front keine oder kaum zusätzliche HRS in Berlin, da hier schon einige HRS bestehen. In Halle (Saale), Hagen, Würzburg und

## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

Jena hingegen werden fast in allen Fällen HRS vorgesehen. In vielen Städten wird das theoretisch zugelassene Maximum von sechs zusätzlichen HRS nicht ausgeschöpft, da ihre Bevölkerung schon mit weniger HRS fast vollständig abgedeckt werden kann. Einige Städte stechen mit hohen HRS-Anzahlen am Ende der Pareto-Front hervor, zum Beispiel Saarbrücken, Recklinghausen oder Wesel. Bei diesen Städten handelt es sich nicht um kreisfreie Städte, sondern um größere Zusammenschlüsse mit umliegenden Gebieten (siehe Tabelle 6.2). Die Bevölkerungsdichte ist in einigen dieser Regionen eher gering, die Gesamtbevölkerung mit jeweils über 400 000 Einwohnern aber hoch. So kann, wenn attraktivere Standorte in anderen Städten bereits genutzt werden, ein Teil der Bevölkerung mit vergleichsweise hohem Aufwand und vielen HRS noch zusätzlich versorgt werden.

Im Anhang E finden sich entsprechende Abbildungen für die Carsharing- und Taxi-flottengrößen sowie ein Vergleich der Szenarien 2a, 2b und 2c.

Die Gestalt des entstehenden HRS-Netzwerks sowie die dadurch ermöglichten Verkehrsströme werden für drei Auslegungen (5 Mio., 10 Mio. und 15 Mio. versorgte Personen) in Szenario 2a in Abbildung 6.18 gezeigt. Das System in Abbildung 6.18a weist zusätzliche HRS unter anderem in Jena, Chemnitz, Halle (Saale), Köln, Frankfurt am Main, Würzburg und München auf. Durch das HRS-Netzwerk wird der kritische Anteil an Fernfahrten von Berlin aus ermöglicht, sodass hier erhebliche Verkehrsströme auch ohne zusätzliche HRS in Berlin möglich werden. Routen, die mit grünen Linien markiert sind, waren auch mit den bestehenden HRS möglich, weiße Linien zeigen neu ermöglichte Routen an. Es sind nur die durch die neu vorgesehenen HRS zusätzlich ermöglichten Verkehrsströme eingetragen. Soll die erfasste Bevölkerung doppelt so groß sein (siehe Abbildung 6.18b), wächst das Netzwerk zusätzlicher HRS auf 57 an und in jedem Bundesland außer im Saarland ist mindestens eine HRS positioniert. Gegenüber der zuvor vorgestellten Situation kommen einige neu ermöglichte Routen dazu, zum Beispiel von Hessen ins Saarland. Mit den übrigen, zusätzlich vorgesehenen HRS werden außerdem die Verkehrsströme auf den bestehenden Routen erweitert. Mit dem in Abbildung 6.18c gezeigten System wird 15 Mio. Personen der Umstieg auf ein FCEV ermöglicht. Zusätzliche HRS werden in den meisten Teilen Deutschlands vorgesehen, vor allem im Westen und entlang wichtiger Verkehrsachsen. Dadurch wird das Netzwerk insgesamt dichter. Die drei Netzwerke wurden unabhängig voneinander bestimmt, weisen aber dennoch Ähnlichkeit auf. So finden sich keine Städte, die im in Abbildung 6.18a gezeigten Fall eine HRS aufweisen, in einem der übrigen Fälle jedoch nicht mehr. Dies gilt größtenteils auch für den Vergleich zwischen Abbildungen 6.18b und Abbildung 6.18c.

Im Folgenden werden die drei Szenarien 2a bis 2c in einem Vergleichspunkt gegenübergestellt (siehe Abbildung 6.19). Errichtung und Betrieb aller drei HRS-Netzwerke verursachen jeweils jährliche Verluste in Höhe von 10 Mio. €. Szenario 2a liegt ein größeres Netzwerk bestehender HRS zugrunde als Szenario 2b, während Szenario 2c gar keine bestehenden HRS annimmt. Im Vergleich fällt auf, dass der Anteil grüner Linien von Szenario 2a über 2b bis zu 2c abnimmt. Das liegt daran, dass wegen des

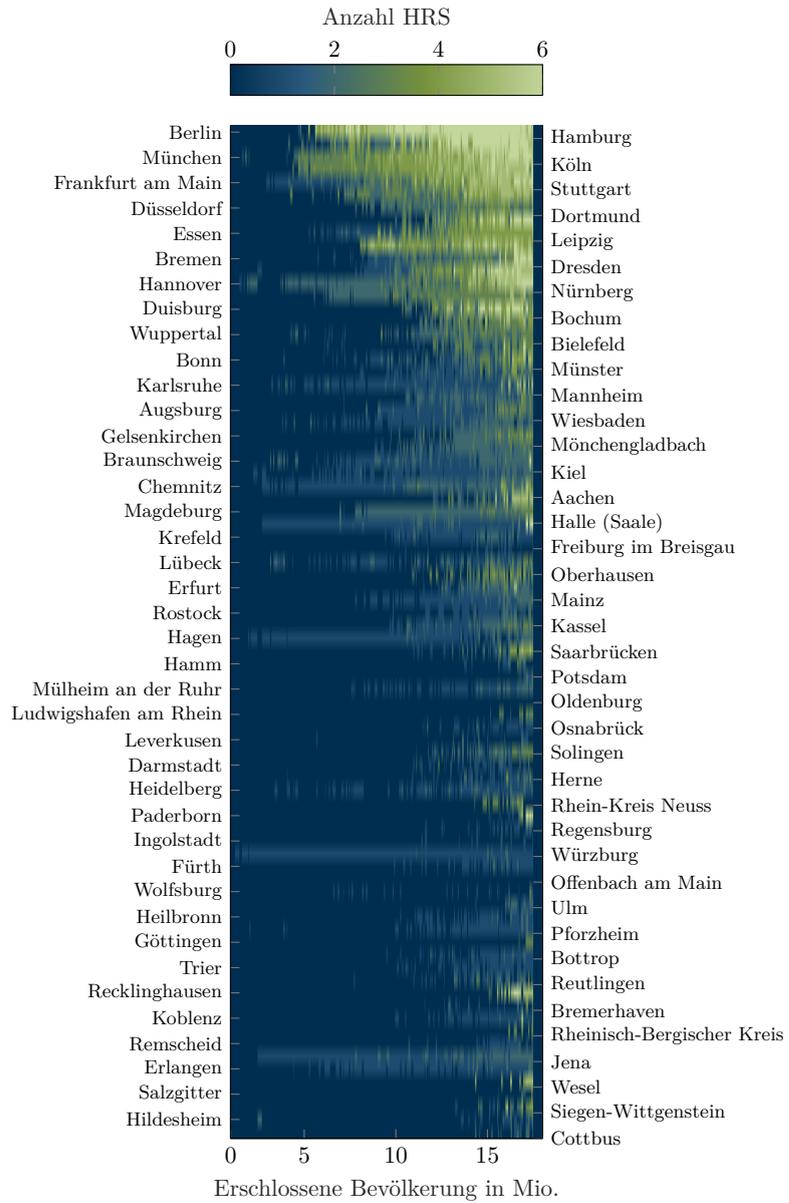


Abbildung 6.17.: Szenario 2a: Anzahl der HRS je Stadt für Elemente der Pareto-Front

## 6. Auslegung eines H<sub>2</sub>-Initialnetzwerks

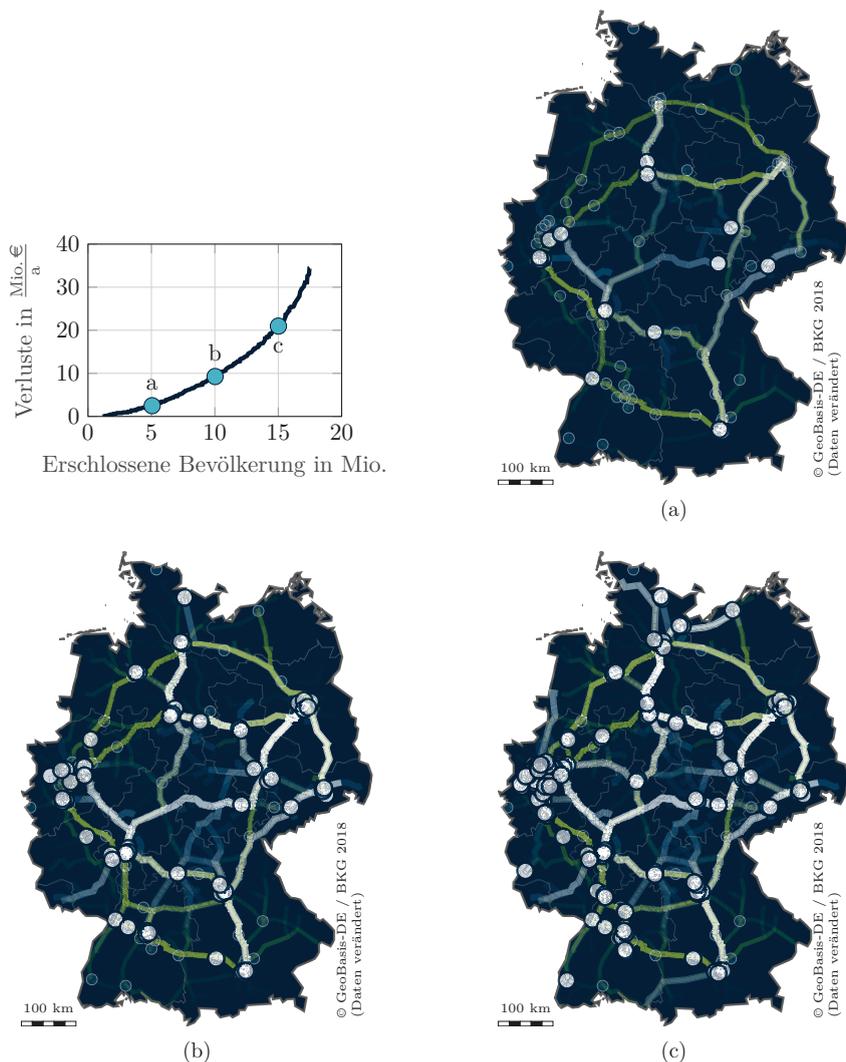


Abbildung 6.18.: Szenario 2a: HRS-Netzwerk für ausgewählte Punkte der Pareto-Front. Ausgefüllte Kreise stehen für zusätzlich vorgesehene HRS, transparente Kreise für bestehende HRS. Linien zeigen zusätzlich ermöglichte Verkehrsströme. Linien sind weiß, wenn die Route mit den neuen HRS erstmals möglich wird

jeweils geringeren bestehenden HRS-Netzes weniger Routen schon zuvor möglich waren. Im Fall von Szenario 2c bestehen zuvor gar keine HRS und folglich sind alle gezeigten Routen erst durch das neu vorgesehene HRS-Netzwerk möglich. In Szenario 2c erkennt man eine Priorisierung der alten Bundesländer, sodass insbesondere Verkehrsströme entlang einer C-förmigen Route von Hamburg über Köln, Frankfurt und Stuttgart bis nach München und zurück über Nürnberg, Würzburg, Kassel und Hannover ermöglicht werden. In den neuen Bundesländern werden nur in Jena, Magdeburg und Berlin HRS vorgesehen. Für diese Städte selbst sind zwar nicht 75 % der Fernfahrten möglich, dadurch wird jedoch anderen Städten das Überschreiten dieser Schwelle ermöglicht. Man kann zudem gut erkennen, dass die HRS in Magdeburg eine Verbindung bis nach Leipzig ermöglicht. In Szenario 2b ist dieselbe Tendenz zu erkennen und die Unterschiede zu Szenario 2c sind gering. Ein auffälliger Unterschied ist eine HRS in Chemnitz, die eine Verbindung aus Süddeutschland bis nach Dresden ermöglicht. Szenario 1a unterscheidet sich deutlich von den übrigen beiden. Hier werden auch zahlreiche HRS in den neuen Bundesländern vorgesehen. Beim Vergleich der drei Szenarien muss berücksichtigt werden, dass in Szenario 1a deutlich mehr HRS zur Verfügung stehen und es sich somit um einen späteren Ausbauzustand des Netzwerks handelt. Gleichwohl bedeutet dies nicht, dass bei einem weniger stark ausgebauten HRS-Netzwerk ebenfalls Westdeutschland bevorzugt würde. In Abbildung 6.18a kann man erkennen, dass auch bei weniger versorgten Personen die neuen Bundesländer nicht grundsätzlich nachrangig um HRS ergänzt werden. Es ist außerdem bemerkenswert, dass einige in Szenario 1a bestehende HRS-Positionen auch in den übrigen Szenarien für den Aufbau einer HRS ausgewählt werden. Neben den Metropolen trifft dies auch beispielsweise auf Münster, Osnabrück und Bielefeld sowie auf Magdeburg und Freiburg zu.

## 6. Auslegung eines H<sub>2</sub>-Initialnetzwerks

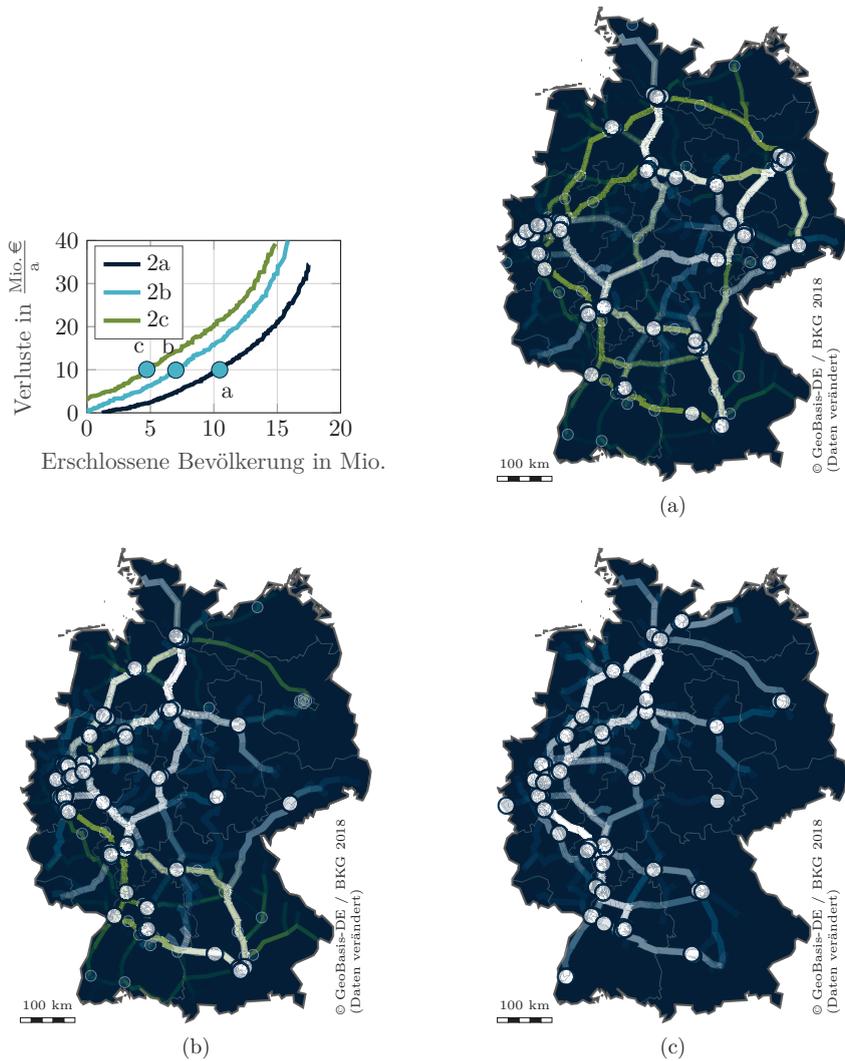


Abbildung 6.19.: Szenarien 2a, 2b, 2c: Vergleich des HRS-Netzwerks. Ausgefüllte Kreise stehen für zusätzlich vorgesehene HRS, transparente Kreise für bestehende HRS. Linien zeigen zusätzlich ermöglichte Verkehrsströme. Linien sind weiß, wenn die Route mit den neuen HRS erstmals möglich wird. Eine Szenarienübersicht zeigt Tabelle 6.3 auf Seite 127

### Mindestinfrastruktur

Die angewendete Methodik sieht vor, dass zur Bewertung eines HRS-Netzwerks die Anzahl der Personen ermittelt wird, denen der Umstieg auf ein FCEV ermöglicht wird. Nur wenn ein Einwohner im Einzugsgebiet einer HRS wohnt und 75 % seiner Fernfahrten vom HRS-Netzwerk ermöglicht werden, wird angenommen, dass er auf ein FCEV umsteigen kann. Unabhängig von der vorgestellten Optimierung des HRS-Netzwerks besteht die Frage, ob ein HRS-Aufbau für Flotten in der hier gezeigten Weise überhaupt die kritische Mindestnetzwerkgröße erreichen kann. Eine solche bietet ersten privaten FCEV bereits eine flächendeckende HRS-Infrastruktur und ist durch die Flotten stärker ausgelastet. Als Kriterium für die Flächendeckung wird definiert, dass ausreichend viele Personen ein HRS-Netzwerk vorfinden, das ihnen erlaubt, 75 % ihrer Fernfahrten zu absolvieren — wenn in der Umgebung ihres Wohnortes eine HRS errichtet würde. Das heißt, es wird nicht gefordert, dass bereits viele Personen im Einzugsgebiet einer HRS leben, sondern dass der Aufbau einer HRS in einer Stadt an ein flächendeckendes Netzwerk anknüpfen kann. In diesem Fall wäre eine schrittweise Erweiterung des HRS-Netzwerks möglich. Im Vergleich zum zuvor angewendeten Verfahren entfällt somit das Kriterium der lokalen Verfügbarkeit von HRS.

Abbildung 6.20 zeigt, wie viele Landkreise in Abhängigkeit der HRS-Anzahl jeweils die Schwelle von 75 %, 80 % und 85 % möglicher Fernfahrten überschreiten. Der Verlauf ist unregelmäßig, da die zugrundeliegenden Datenpunkte auf der zuvor durchgeführten Optimierung mit anderen Optimierungszielen basieren. Der aktuelle Ausbau- und Planungsstand des HRS-Netzwerks, abgebildet in Szenario 2a, ermöglicht in 30 % der Landkreise 75 % der Fernfahrten. Erhöht man die Anforderungen weiter auf 80 % beziehungsweise 85 % der Fernfahrten, sinkt die Anzahl der Landkreise, für die diese Bedingung erfüllt wird auf 11 % beziehungsweise 1 %. Die gezielte Positionierung von etwa 30 weiteren HRS führt bereits zu einem erheblichen Anstieg, sodass für 75 % der Landkreise mindestens 75 % der Fernfahrten möglich sind. Vergleicht man Szenario 2a mit Szenario 2c, so ist auffällig, dass die Verläufe bis etwa 100 HRS ähnlich und durch einen verhältnismäßig starken Anstieg gekennzeichnet sind. Die größten Unterschiede in diesem Bereich bestehen für den Fall, dass 85 % der Fernfahrten möglich sein müssen. Hier ist Szenario 2c vorteilhaft. Während jedoch für mehr als etwa 120 HRS in Szenario 2c nur noch geringe Anstiege zu erkennen sind, setzt sich in Szenario 2a der Anstieg fort. Der Anteil der Landkreise, die die Anforderungen erfüllen, erreicht hier teils deutlich höhere Werte. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass in Szenario 2a durch den Bestand von 71 HRS insgesamt mehr HRS vorgesehen werden können. Ein weiterer Grund ist, dass durch den Bestand an HRS sich im Zuge der Optimierung eine andere Netzwerkgestalt herausbildet. In Szenario 2c entsteht ein Netzwerk, das insbesondere in westdeutschen Landkreisen den Umstieg auf ein FCEV ermöglicht. Weitere HRS werden dann dazu genutzt, in diesen Landkreisen zusätzliche Bevölkerungsteile zu erschließen anstatt zusätzlichen Landkreisen das Erreichen des Grenzwerts zu ermöglichen.

## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

Setzt man nun als Kriterium für eine Mindestinfrastruktur an, dass für mindestens 75 % der Landkreise mindestens 75 % der Fernfahrten möglich sein müssen, so beträgt die erforderliche HRS-Anzahl in beiden Szenarien etwa 110 bis 115. Soll dies für 90 % der Landkreise gelten, sind in Szenario 2a etwa 170 HRS erforderlich, während Szenario 2c in keinem Fall diesen Wert erreicht. Da Fernfahrten nur einen kleinen Teil aller Fahrten ausmachen, können im Mittel 98,5 % aller Fahrten in andere Landkreise absolviert werden, wenn 75 % der Fernfahrten ermöglicht werden. Deshalb kann ein Initialnetzwerk aus 110 bis 170 HRS in Deutschland als ausreichende Mindestinfrastruktur angesehen werden. Das heißt, zusätzlich zu den 71 bestehenden müssten 39 bis 99 weitere HRS gezielt positioniert werden. Dies verursacht jährliche Verluste von 6,1 Mio. € bis 15,5 Mio. €. Die Ergebnisse dieses Kapitels zeigen, dass dies auf Basis von Infrastruktur für Flotten möglich ist. Wird allerdings gefordert, dass für 90 % der Landkreise 90 % der Fernfahrten möglich sein sollen, so ist dies mit dem hier vorgeschlagenen Ansatz und der Beschränkung auf Städte mit mindestens 100 000 Einwohnern nicht möglich.

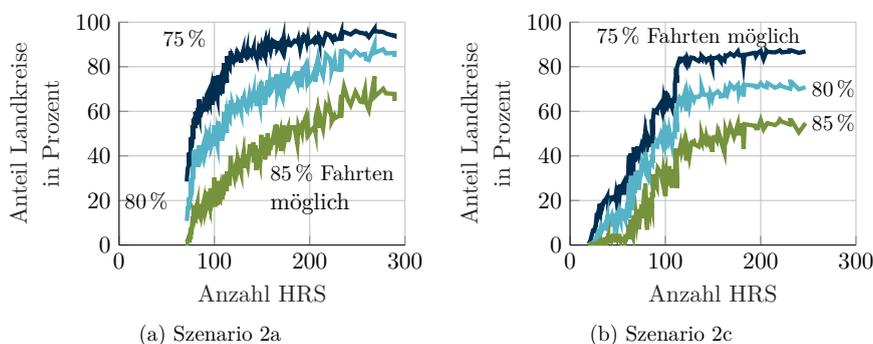


Abbildung 6.20.: Anteil der Landkreise, für die ein Mindestanteil der Fahrten möglich ist in Abhängigkeit der HRS-Anzahl

### 6.4. Zusammenfassung von Kapitel 6 und Literaturabgleich der Annahmen

In diesem Kapitel wurde eine Methodik zur gleichzeitigen Optimierung eines HRS-Netzwerks und einer Flottenkonfiguration vorgestellt und angewendet. Ziele der Optimierung waren eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit und ein möglichst hoher Nutzen des Netzwerks für private Fahrer von FCEV. Dabei wurde auf Ergebnisse des Kapitels 5 zur Wirtschaftlichkeit einzelner HRS aufgebaut. Im Folgenden werden die Elemente der Methodik sowie die Ergebnisse zusammengefasst. Anschließend werden die getroffenen Annahmen mit Angaben aus der Literatur abgeglichen. Ein Literatur-

#### 6.4. Zusammenfassung von Kapitel 6 und Literaturabgleich der Annahmen

abgleich der Ergebnisse erfolgt im Zuge einer kapitelübergreifenden Diskussion der Ergebnisse in Kapitel 6.5.

##### **Zusammenfassung der Methodik**

Als Grundlage für die weitere Untersuchung wurden zwei Methoden entwickelt und vorgestellt. Die erste ermöglicht eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines HRS-Netzwerks im Zusammenspiel mit Fahrzeugflotten (siehe Kapitel 6.1.1). Die zweite Methode betrifft die Bewertung des Nutzens eines HRS-Netzwerks und wurde auf Basis der Literaturanalyse aus Kapitel 3.4 entwickelt (siehe Kapitel 6.1.2). Grundsätzlich wird der Nutzen quantifiziert, indem ermittelt wird, wie vielen Personen die jeweilige HRS-Infrastruktur den Umstieg auf ein FCEV ermöglicht. Es wird angenommen, dass ein Umstieg für einen Einwohner einer Stadt dann möglich ist, wenn sich mindestens eine HRS in 10 Minuten Fahrtfernung von seinem Wohnort befindet und mindestens 75 % seiner Fernfahrten ohne Umwege mit einem FCEV möglich sind. Um dieses Kriterium prüfen zu können, werden realistische Routenverläufe von jedem Landkreis in jeden anderen Landkreis sowie Daten zu Fahrthäufigkeiten für jede Ursprung-Ziel-Verbindung zugrunde gelegt. Diese beiden Methoden werden im Rahmen der anschließenden Optimierung verwendet. Im ersten Optimierungsschritt (siehe Kapitel 6.1.3) wird jede Stadt separat betrachtet. Für jede mögliche Kombination aus Flottentypen, der Anzahl zu positionierender HRS sowie anzuschließenden Fernstraßen werden optimale HRS-Positionen gefunden. Optimalitätskriterium ist die Anzahl der Personen, die im Einzugsgebiet einer HRS leben. Flottengrößen spielen keine Rolle für die Positionierung der HRS. Im zweiten Schritt (siehe Kapitel 6.1.4) werden ebenfalls alle Städte separat betrachtet und für jede Stadt durch Variation der Flottentypen und HRS-Anzahl mehrere optimale Kombinationen ausgewählt. Es gibt zwei Optimierungsziele: Möglichst hoher Anteil versorgter Bevölkerung und möglichst hohe Wirtschaftlichkeit. Da die Ziele nicht gleichzeitig erreichbar sind, ergeben sich unterschiedliche Kompromisse hinsichtlich der Ziele. Im dritten und letzten Optimierungsschritt (siehe Kapitel 6.1.5) werden alle Städte gemeinsam betrachtet und unter den zuvor bestimmten Lösungen für jede Stadt optimale Varianten ausgewählt. Dabei gibt es zwei Optimierungsziele, zu deren Quantifizierung die beiden zuvor beschriebenen Methoden genutzt werden: Das entstehende HRS-Netzwerk soll einen möglichst hohen Nutzen für private Fahrer haben und eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit aufweisen. Auch diese beiden Ziele sind nicht gleichzeitig erreichbar, sodass sich verschiedene Kompromisse ausprägen. Diese dreischrittige Optimierung wurde auf fünf Szenarien angewendet (siehe Kapitel 6.2), die sich hinsichtlich des Betrachtungsgebiets (12 Städte in den neuen Bundesländern oder 80 Städte im gesamten Bundesgebiet) sowie des angenommenen Bestands an HRS unterscheiden.

##### **Zusammenfassung der Ergebnisse**

Die im ersten Optimierungsschritt gefundenen HRS-Positionen wurden für ausgewählte Varianten in den Städten Berlin, Köln und Dresden gezeigt und diskutiert.

## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

Es zeigte sich, dass ein Carsharing-Betrieb zumeist mehr HRS erfordert als der Betrieb von Taxis. Im zweiten Optimierungsschritt identifizierte Flottenkombinationen wurden am Beispiel der Städte Berlin und Dresden beschrieben. Anhand der individuell für jede Variante optimierten Flottengrößen lässt sich erkennen, dass die ideale Flottenzusammensetzung je nach Situation und Randbedingungen sehr unterschiedlich ausfallen kann. Die bestehenden HRS tragen nicht in jedem Fall dazu bei, die Randbedingungen der Flotten zu erfüllen. Die in dieser Arbeit maximal zugelassene Anzahl zusätzlicher HRS genügt bei sehr ausgedehnten Gebieten zudem nicht immer den Anforderungen eines Carsharing-Betriebs. Die Ergebnisse des dritten Schritts bestehen für jedes Szenario in einem optimierten HRS-Netzwerk und dazu passenden Flottenkombinationen. Wie sich bereits in Kapitel 5 zeigte, ist unter den gewählten Randbedingungen kein wirtschaftlicher Betrieb möglich, das heißt, es entstehen jährliche Verluste. Das Netzwerk aus 71 bestehenden und geplanten HRS ermöglicht 1,2 Mio. Personen den Umstieg auf ein FCEV. Die jährlichen Verluste steigen umso stärker an, je mehr Personen der Umstieg ermöglicht werden soll. Sollen beispielsweise durch den Aufbau von HRS nur in den neuen Bundesländern insgesamt 4 Mio. Personen versorgt werden, entstehen jährliche Verluste von etwa 3 Mio. €. Der Anstieg der Verluste ist dabei nahezu proportional zur Anzahl der errichteten HRS. Wenn nur in den betrachteten 12 Städten der neuen Bundesländer HRS ergänzt werden, können maximal knapp 5 Mio. Personen versorgt werden. Wird eine Erweiterung des HRS-Netzwerks hingegen in den 80 größten Städten des Bundesgebiets zugelassen, können bei identischen jährlichen Verlusten mehr Personen versorgt werden, weil mehr geeignete Standorte verfügbar sind. Bei einem jährlichen Verlust von 10 Mio. € können beispielsweise über 10 Mio. Personen versorgt werden. Maximal kann 17,5 Mio. Personen der Umstieg auf ein FCEV ermöglicht werden. In diesem Fall entstehen jährliche Verluste in Höhe von 34,5 Mio. €. Flotten sind fast immer Teil einer optimalen Lösung, ihr Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit ist jedoch nicht dominant, sodass es in einigen Städten auch geeignete Lösungen ohne Flotten gibt. Die entwickelte Methode ermöglicht die optimierte HRS-Netzwerkplanung. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die optimale Netzwerkgestalt je nach Ausbaustufe und Randbedingungen unterscheiden kann. Es gibt jedoch einige Standorte, die eine besondere strategische Bedeutung für das Gesamtnetzwerk aufweisen, unter anderem Hagen, Halle (Saale), Jena und Würzburg. An der Gestalt der entstehenden HRS-Netzwerke für drei verschiedene Ausbaustufen lässt sich erkennen, dass Systeme mit einer höheren HRS-Anzahl Auslegungen mit geringerer HRS-Anzahl teils ähnlich sind, also nur wenige HRS-Positionen der kleineren Auslegung in der größeren entfallen.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass der Ansatz, Flottenfahrzeuge mit HRS zu kombinieren, in Deutschland eine ausreichende Mindestinfrastruktur induzieren kann. Eine solche umfasst in Deutschland 110 bis 170 gezielt positionierte HRS. Dieses Netzwerk ermöglicht dann bereits 8 Mio. bis 13 Mio. Personen, auf ein FCEV umzusteigen und jede weitere HRS kann an ein flächendeckendes HRS-Netzwerk anknüpfen. Aufbau und Betrieb der dafür erforderlichen, zusätzlichen 39 bis 99 HRS verursachen jährliche Verluste von 6,1 Mio. € bis 15,5 Mio. €. Aus den Ergebnissen lässt sich die Empfeh-

lung ableiten, die bisherigen Ausbauziele in Deutschland zu erweitern. Diese sehen bislang den Aufbau von 100 HRS unabhängig vom Fahrzeugbestand vor.

#### Literaturabgleich der Annahmen

Die angenommene Reichweite von FCEV hat in dieser Arbeit Einfluss auf das auszuliegende HRS-Netzwerk, da sie mitentscheidend dafür ist, welche Routen bei einem gegebenen HRS-Netzwerk möglich sind. Die effektive Reichweite wird mit 333,33 km angenommen und soll neben einem höheren Verbrauch auf Fernfahrten berücksichtigen, dass Fahrer typischerweise nicht die volle theoretische Reichweite ausnutzen. Diese liegt gegenwärtig bei etwa 500 km [5]. In vergleichbaren Arbeiten werden folgende Annahmen getroffen. Melendez et al. (2005) [62] gehen für das Jahr 2020 und 2030 von 480 km Reichweite aus. Andere Autoren unterscheiden zwischen der technischen und der effektiven Reichweite. So weisen Kuby et al. (2009) [96] als technische Reichweite ebenfalls 480 km aus, gehen in ihrer Analyse aber von einer effektiven Reichweite von 160 km aus. Hong et al. (2016) [100] übernehmen diesen Ansatz, wählen als effektive Reichweite jedoch 320 km. Verglichen mit den in diesen Arbeiten getroffenen Annahmen zur effektiven Reichweite ist der für die vorliegende Arbeit gewählte Wert eher ambitioniert. Legt man jedoch die technische Reichweite und den Reifegrad heutiger Fahrzeuge zugrunde, so ist die gewählte Reichweite als konservativ einzuschätzen.

In dieser Arbeit wird für verschiedene Wasserstoffnachfrager jeweils ein Einzugsgebiet von HRS definiert. Für private PKW-Fahrer wird als eine Voraussetzung für den Umstieg auf ein FCEV angenommen, dass sich eine HRS in höchstens 10 Minuten Fahrtentfernung befinden muss. Dies entspricht bei der angenommenen Luftliniengeschwindigkeit einem Radius von 2833 m. Das gleiche Einzugsgebiet wird für Taxistände definiert, während für Busse dieselbe zulässige Fahrtdauer bei abweichender Durchschnittsgeschwindigkeit angenommen wird. Für Busdepots beträgt der zulässige Abstand zu einer HRS daher 1667 m. Darüber hinaus wird ein zulässiger Abstand einer HRS von der Route einer Fernfahrt definiert, der für einen Tankstopp akzeptiert wird. Dieser beträgt 3000 m. Während sich für Busse in der Literatur keine Angaben zu zulässigen Abständen finden lassen, kann das Einzugsgebiet für PKW mit Annahmen anderer Arbeiten verglichen werden. Stephens-Romero et al. (2011) [39] klassifizieren verschiedene Einzugsgebiete nach Fahrtauern von 2, 4 und 6 Minuten. Letzteres entspricht einem Radius von 1700 m. Frick et al. (2007) [105] verwenden ein Einzugsgebiet mit einem Radius von 5000 m. Hinsichtlich des tolerierbaren Umwegs zum Erreichen einer HRS gehen Brey et al. (2016) [86] in zwei Stufen von 500 m und 1000 m aus. Darüber hinaus gibt es empirische Erhebungen zum Tankverhalten von konventionellen Fahrzeugen. Diese ergeben, dass 72 % [82] beziehungsweise 83 % [85] der Tankvorgänge in höchstens 10 Minuten Fahrtentfernung des Zuhauses stattfinden. Diese Bandbreite an angenommenen Einzugsgebieten legt nahe, dass die in dieser Arbeit getroffenen Annahmen (10 Minuten Fahrtentfernung entsprechend 1667 m Luftlinienentfernung) innerhalb des üblichen Spektrums liegen, aber als vergleichsweise

## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

groß angesehen werden können.

Neben den diskutierten Parametern ist auch der Anteil der Fernfahrten relevant, der durch das HRS-Netzwerk ermöglicht werden muss, damit ein Umstieg auf ein FCEV als möglich angenommen wird. Ein ähnlicher Ansatz besteht zwar in der Literatur [100] (siehe auch Kapitel 3.4.3), aber dieser Parameter wurde nicht eindeutig quantifiziert, sodass ein Vergleich nicht möglich ist.

## 6.5. Literaturabgleich der Ergebnisse und Gesamtdiskussion

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse dieses Kapitels in den Kontext anderer Arbeiten gestellt und mit diesen verglichen. Dies erfolgt in Form einer Gesamtdiskussion der Arbeit und ihrer Ergebnisse, da dieses Kapitel Vorarbeiten aus vorangegangenen Kapiteln aufgreift und zu übergeordneten Ergebnissen führt. Zunächst erfolgt ein methodischer Vergleich des Ansatzes mit der Literatur, während im Anschluss Ergebnisse quantitativ verglichen werden. Abschließend werden Schlussfolgerungen abgeleitet.

### Methodischer Literaturabgleich des Ansatzes

In der Anfangsphase des Aufbaus eines Wasserstofftankstellennetzwerks besteht das besondere Problem, dass die Auslastung der Tankstellen gering und der Betrieb deshalb nicht wirtschaftlich ist. Gleichzeitig ist das Netzwerk nicht flächendeckend und steht so einem Markthochlauf von Brennstoffzellenfahrzeugen entgegen. In der Literatur werden zwei Ansätze genannt, die dieses Problem mindern und einen schrittweisen Markthochlauf ermöglichen sollen: Der Cluster-Ansatz und der Einsatz von Flottenfahrzeugen. Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz wird im Folgenden diesen Ansätzen gegenübergestellt.

Der Cluster-Ansatz sieht die Beschränkung des HRS-Aufbaus auf einige Gebiete (Cluster) vor. So soll mit vergleichsweise geringem Aufwand für einen Teil der Bevölkerung ein lokal ausreichend dichtes HRS-Netzwerk geschaffen werden. Ein flächendeckender Aufbau von Wasserstofftankstellen entfällt daher. Der Cluster-Ansatz wird von Ogden et al. (2011) [60], Stephens-Romero et al. (2011) [39] und Brey et al. (2014) [61] besprochen und simulativ untersucht (siehe Kapitel 3.1.3). Allerdings wird die entscheidende Frage zu diesem Ansatz nicht behandelt: Wie vielen Personen genügt eine räumlich begrenzte Tankinfrastruktur, um tatsächlich ein FCEV einzusetzen? Als Kriterium für die Güte der Kraftstoffversorgung wird der Abstand einer HRS zum jeweiligen Wohnort herangezogen. Die Literatur zeigt zwar, dass die Verfügbarkeit einer HRS in der Nähe des Start- oder Zielorts einer Fahrt ein wichtiges Kriterium ist [82], [85], [86] und in den meisten Fällen ist der Wohnort der Startort einer Fahrt. Allerdings kann die Verfügbarkeit einer HRS am Zielort einer Fahrt somit als ebenso wichtig wie die Verfügbarkeit einer HRS am Wohnort angesehen werden.

Darüber hinaus legen andere Studien nahe, dass vorrangig Verfügbarkeit von Tankinfrastruktur entlang der Fahrtrouten wichtig ist [83], [84]. Um die Wirksamkeit des Cluster-Ansatzes zu bewerten, fehlt es folglich an einer belastbaren Methodik.

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Methodik kann auch als Cluster-Ansatz aufgefasst werden, da HRS nicht zwangsläufig flächig im Betrachtungsgebiet verteilt werden. Allerdings wird der Nutzen der entstehenden HRS-Infrastruktur mit einer eigens entwickelten Methodik bewertet und als Positionierungskriterium von HRS herangezogen (siehe Kapitel 6.1). So entsteht ein HRS-Netzwerk, das so begrenzt wie möglich aber so weitverteilt ist, wie zur Erreichung eines gewünschten Nutzens erforderlich ist. Somit geht diese Arbeit über die bisherigen Untersuchungen hinaus und liefert eine Methodik zur Bewertung von HRS-Netzwerken und Cluster-Strategien.

Der zweite Ansatz, um die Hürden der Anfangsphase des Infrastrukturaufbaus zu verringern, ist der Aufbau von HRS für Fahrzeugflotten mit begrenzten Infrastrukturanforderungen. Dazu zählen beispielsweise Stadtbusse oder Taxis, da diese Fahrzeuge Tankinfrastruktur nur in der Stadt erfordern, in der sie eingesetzt werden. Es muss somit kein flächendeckendes Netzwerk vorhanden sein, um diese Fahrzeuge einsetzen zu können. Gleichzeitig können diese Fahrzeugflotten die Tankinfrastruktur auslasten. Dieser Ansatz wird unter anderem von Melendez et al. (2005) [62], Sheyagan et al. (2009) [38], Keles et al. (2008) [56], Melo et al. (2014) [63] und Robinius et al. (2018) [30] propagiert oder erwähnt, während Melaina et al. (2008) [48] ihm kritisch gegenüberstehen (siehe Kapitel 3.1.3). Keine der Arbeiten quantifiziert jedoch das Potential des Einsatzes von Flotten, weder im Hinblick auf die Kostenreduktion auf Tankstellenseite noch hinsichtlich der Frage, wie viele zusätzliche Wasserstofftankstellen so geschaffen werden können.

In der vorliegenden Arbeit wurde ermittelt, dass die Verluste aus dem Betrieb einer HRS reduziert werden können, wenn sie zusätzlich Carsharing- und Taxiflotten versorgt — auch wenn sie dann anders dimensioniert werden muss. Bei leicht geänderten Randbedingungen kann die Integration von Flottenfahrzeugen sogar zu einem Gewinn aus dem Tankstellenbetrieb führen (siehe Kapitel 5.2.3). Zudem wurden für unterschiedliche Szenarien ermittelt, wie viele zusätzliche HRS so in Deutschland errichtet werden können (siehe Kapitel 6.3). Diese Arbeit geht methodisch über die bisherigen Untersuchungen hinaus, sodass ein quantitativer Vergleich mit der Literatur für einen Teil der Ergebnisse nicht möglich ist. Dies betrifft die Auslegung einer HRS für verschiedene Flotten, der Einfluss von Flottenfahrzeugen auf die Wirtschaftlichkeit von HRS, die Quantifizierung des Netzwerknutzens sowie die ermittelte HRS-Netzwerkgestalt in den verschiedenen Szenarien.

### **Quantitativer Literaturabgleich der Ergebnisse**

Die Ergebnisse dieses Kapitels und der Arbeit als Ganzes betreffen — unabhängig von Flottenfahrzeugen — die Mindestanzahl an HRS, die ein Netzwerk aufweisen sollte, um einen Markthochlauf zu ermöglichen. Es wurde ermittelt, dass mindestens

## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

21 HRS nötig sind, damit überhaupt ein zusammenhängendes Netzwerk entstehen kann. Andernfalls handelt es sich lediglich um nicht zusammenhängende, einzelne Initialzellen. Weiterhin wurde in dieser Arbeit ein neues Kriterium für eine Mindestinfrastruktur eingeführt (siehe Kapitel 6.3.3). Dieses beschränkt sich auf den Aspekt der Flächenabdeckung und besagt, dass ein bestimmter Anteil der Fernfahrten im Betrachtungsgebiet aus einem Mindestanteil der Landkreise möglich sein muss. Als Schwellenwerte werden 75 % der Fernfahrten für mindestens 75 % der Landkreise vorgeschlagen. Eine optionale Verschärfung des Kriteriums auf 90 % der Landkreise scheint ebenfalls plausibel. Diese Kriterien sind zwar keine hinreichende Bedingung dafür, dass Menschen auf FCEV umsteigen können, aber eine notwendige. Denn nur in diesem Fall erfüllt das HRS-Netzwerk die Anforderungen an die Flächenabdeckung. Einwohner, die dann im Einzugsgebiet einer HRS leben, können auf ein FCEV umsteigen. Das heißt, jede weitere HRS erweitert ein funktionierendes HRS-Netzwerk und versorgt zusätzliche Personen. Auf Basis dieses Initialnetzwerks kann also ein weiterer Aufbau schrittweise erfolgen.

Szenario 2a dieser Arbeit beschreibt den Fall, dass aufbauend auf den bestehenden und geplanten HRS ein Netzwerk in den 80 größten Städten in Deutschland errichtet wird. Basierend auf diesem Szenario wurde ermittelt, dass 110 HRS nötig sind, damit in 75 % der Landkreise 75 % der Fernfahrten ermöglicht werden. Soll dies für mindestens 90 % der Landkreise gelten, sind etwa 170 HRS nötig. Diese Spannweite wird als Ergebnis für die Mindestinfrastruktur angesehen. Dem gegenüber stehen die in Kapitel 3.1.2 vorgestellten Literaturangaben für eine Mindestinfrastruktur. Diese reichen umgerechnet auf Deutschland von 145 bis 8300 HRS, beziehen sich jedoch auf unterschiedliche Annahmen und Szenarien. Die besonders hohen Angaben von Nicholas et al. (2005) [55] gelten für einen Fall, in dem das HRS-Netzwerk nahezu dem Netzwerk konventioneller Tankstellen entspricht und sind somit für einen Vergleich mit Angaben für eine Mindestinfrastruktur ungeeignet, da sie einen weit fortgeschrittenen Ausbauzustand abbilden. Gleiches gilt für die Studie GermanHy [50] und die Arbeiten von Krieg (2012) [51], Robinius (2015) [52] und Hartmann (2017) [53]. Die übrigen Literaturangaben — drei Ansätze von Melaina et al. (2003) [54] und ein Wert von Huétink et al. (2010) [57] — sind in Abbildung 6.21 den in dieser Arbeit erzielten Ergebnissen gegenübergestellt. Alle Angaben sind auf Deutschland bezogen und deshalb erforderlichenfalls entsprechend umgerechnet.

Die hier vorgeschlagenen Anzahlen an HRS für eine Mindestinfrastruktur liegen deutlich unter den meisten Vergleichswerten, entsprechen aber in etwa dem niedrigeren Wert des zweiten Ansatzes von Melaina et al. Diese teils großen Unterschiede lassen sich mit den jeweils zugrundeliegenden Kriterien für eine Mindestinfrastruktur erklären. Letztendlich sollen alle diese Kriterien abbilden, ob ein HRS-Netzwerk den Anforderungen der PKW-Fahrer soweit genügt, dass diese auf ein FCEV umsteigen können. Das Kriterium des ersten Ansatzes (Melaina 1) besteht in einem festen Anteil, den HRS an allen Tankstellen ausmachen sollen und orientiert sich dabei folglich stark am bestehenden Netzwerk konventioneller Tankstellen. Damit werden die tatsächlichen Anforderungen der Fahrer nur indirekt abgebildet. Der zweite Ansatz

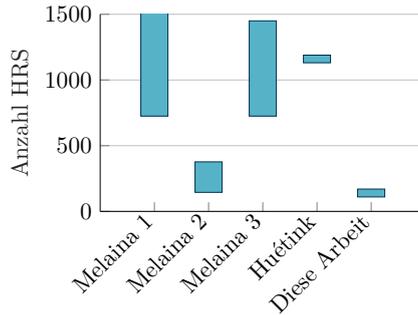


Abbildung 6.21.: Vergleich von Angaben zur Mindestinfrastruktur, umgerechnet auf Deutschland [54], [57]

(Melaina 2) legt als Kriterium die maximale Fahrtdauer zu einer HRS in einer Metropole an. Damit wird zwar den Anforderungen an eine lokale Verfügbarkeit von HRS Rechnung getragen, die Anforderungen einer Flächenabdeckung für Fernfahrten bleiben jedoch unberücksichtigt. Der dritte Ansatz (Melaina 3) wiederum limitiert den Abstand zwischen HRS auf Hauptverkehrsstraßen. So werden Fernfahrten indirekt abgebildet. Welche und wie viele Routen tatsächlich möglich wären, bleibt jedoch unbeantwortet. Der vierte Ansatz (Huétink) ist abstrakt und orientiert sich nicht an einem realistischen Szenario. Somit bildet der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz die Anforderungen von Fahrern an die Flächendeckung eines HRS-Netzwerks unmittelbarer ab als bisherige Ansätze und liefert damit die verlässlichsten Ergebnisse.

### Schlussfolgerungen

Die Forschungsfragen aufgreifend können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden.

1. Unter welchen Voraussetzungen kann der Einsatz von Flottenfahrzeugen die Wirtschaftlichkeit von HRS verbessern?

Die Kombination von HRS mit Flottenfahrzeugen kann unter den angenommenen Randbedingungen zwar keinen wirtschaftlichen HRS-Betrieb ermöglichen, die Verluste jedoch in den meisten Fällen reduzieren. Deshalb sollten Flottenbetreiber in den weiteren Ausbau des HRS-Netzwerks eingebunden werden. Damit ein wirtschaftlicher Aufbau und Betrieb von Wasserstofftankstellen möglich wird, sind mehrere Maßnahmen erforderlich.

Eine gewichtige regulatorische Hürde für erneuerbar hergestellten Wasserstoff sind die Steuern, Abgaben und Umlagen auf Strom aus Erneuerbare-Energie-Anlagen. Selbst für den hier betrachteten Fall, dass der Betreiber des Elektrolyseurs eigene WEA errichtet und betreibt, fallen 40% der EEG-Umlage

## 6. Auslegung eines $H_2$ -Initialnetzwerks

auf den selbst produzierten und verbrauchten Strom an. Nur wenn diese Kosten entfallen, wird ein wirtschaftlicher Betrieb realistisch. Andernfalls müsste der Wasserstoffpreis selbst bei einer signifikanten Kostenreduktion der HRS-Komponenten deutlich angehoben werden. Die EEG-Umlage sollte folglich für die Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse und Erneuerbaren Energien erlassen werden.

Der gegenwärtige Wasserstoffverkaufspreis von  $7,98 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  netto sollte mindestens um  $0,50 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  angehoben werden. Damit gleiche Kilometerkosten wie bei konventionellen Kraftstoffen erreicht werden, müsste der Benzinpreis dann etwa  $1,54 \frac{\text{€}}{\text{l}}$  brutto betragen (Angenommene Verbräuche:  $0,76 \frac{\text{kg}}{100 \text{ km}}$  und  $5 \frac{\text{l}}{100 \text{ km}}$ ). Für den Fall, dass die EEG-Umlage bestehen bleibt, müsste der Wasserstoffpreis um etwa  $2 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  angehoben werden.

Ein realistisches Szenario für einen wirtschaftlichen HRS-Betrieb sieht neben dem Entfall der EEG-Umlage und einer Verkaufspreiserhöhung um  $0,50 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  eine Kostenreduktion der HRS-Komponenten um 20 % vor.

2. Wie und wo sollten Flotten mit HRS kombiniert werden, um das HRS-Netzwerk für private PKW aufzuwerten?

Einige Standorte, die bislang über keine HRS verfügen, sind von besonderer strategischer Bedeutung für die Wertigkeit des HRS-Gesamtnetzwerks. Dazu zählen Hagen, Halle (Saale), Jena und Würzburg. Mindestens in diesen Städten sollten zusätzliche HRS errichtet werden. Für die genaue Positionierung von HRS innerhalb der Städte sowie für die Auswahl weiterer Standorte kann die in dieser Arbeit entwickelte Methodik angewendet werden.

3. Wie viele HRS sind für eine ausreichende Mindestinfrastruktur nötig?

Es wurde gezeigt, dass etwa 170 HRS für ein Initialnetzwerk genügen und damit die besonderen Probleme der Initialphase als überwunden angesehen werden können. Jede weitere, nachfrageorientiert zugebaute HRS kann dann an ein funktionierendes HRS-Netzwerk anknüpfen, sodass für die meisten Einwohner im Einzugsgebiet dieser HRS die infrastrukturellen Bedingungen für einen Umstieg auf ein FCEV erfüllt sind. Die Voraussetzungen für einen schrittweisen Markthochlauf von Mobilität mit Brennstoffzellenfahrzeugen sind folglich deutlich geringer als bislang angenommen. Das gegenwärtige Ausbauziel von 100 HRS bleibt jedoch noch dahinter zurück und sollten deshalb entsprechend auf 170 erhöht werden. Im Dezember 2017 waren bereits über 70 HRS in Betrieb oder in Planung, sodass darüber hinaus etwa weitere 100 HRS vorgesehen werden sollten.

4. Kann der Ansatz, Flotten und HRS gemeinsam einzusetzen eine ausreichende Mindestinfrastruktur induzieren?

Werden HRS für Flottenfahrzeuge in den 80 bevölkerungsreichsten Städten gezielt positioniert, kann eine ausreichende Mindestinfrastruktur erreicht werden. Diese vorgeschlagene Initialinfrastruktur kann jedoch zu Beginn noch nicht wirtschaftlich sein und benötigt pro Jahr Unterstützung in Höhe von knapp 16 Mio. €. Würden alle zusätzlich erforderlichen HRS im Jahr 2019 aufgebaut, ergäben sich bis zum Jahr 2030 somit Kosten in Höhe von knapp 200 Mio. €. Verglichen mit anderen Infrastrukturinvestitionen sind diese Kosten gering. Beispielsweise wird für den Ausbau der Stromnetze bis zum Jahr 2030 mit Kosten in Höhe von über 30 Mrd. € gerechnet [180]. Die vorgeschlagene Erweiterung des HRS-Netzwerks würde somit nur knapp 0,7 % dieser Kosten ausmachen. Der Aufbau dieses Initialnetzwerks sollte weiterhin durch Staat und Industrie unterstützt werden, um die Voraussetzungen für eine marktgetriebene, weitere Entwicklung von FCEV-Bestand und HRS-Netzwerk zu schaffen.



## 7. Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden zunächst die der Arbeit zugrundeliegende Motivation und die daraus abgeleitete Zielsetzung dargestellt. Anschließend werden Methodik und Ergebnisse zusammengefasst. Ausführliche Zusammenfassungen der einzelnen Kapitel finden sich in den Kapiteln 2.3, 4.5, 5.3 und 6.4.

### Motivation

Der heutige Straßenverkehr geht mit Problemen wie Schadstoff- und Kohlendioxid-ausstoß einher. Der Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) mit Wasserstoff als Kraftstoff ist eine wichtige Maßnahme, um diesen Problemen wirkungsvoll zu begegnen. Ein Markthochlauf von FCEV erfordert jedoch eine ausreichende Tankinfrastruktur in Form von Wasserstofftankstellen (HRS). Fahrer von PKW erwarten ein lokal und flächendeckend verfügbares HRS-Netzwerk. Aufbau und Betrieb von HRS sind in der Initialphase jedoch unwirtschaftlich, da sie wegen des geringen Fahrzeugbestands nicht ausgelastet werden. Gegenwärtig wird das Ziel verfolgt, eine 100 HRS umfassende Mindestinfrastruktur unabhängig von Fahrzeugbestand und Wirtschaftlichkeit zu errichten, die die Anforderungen an Flächendeckung erfüllen soll.

Da keine Methodik zur Quantifizierung des Nutzens von HRS-Netzwerken besteht, ist jedoch ungewiss, ob diese Pläne ausreichend sind, um Wasserstoff als Kraftstoff zu etablieren. Zudem fehlt es an einer ergänzenden oder alternativen Strategie, um die beschriebenen Probleme in der Initialphase des Aufbaus eines HRS-Netzwerks zu überwinden. Eine solche könnte im gemeinsamen Einsatz von Flottenfahrzeugen und HRS bestehen, da Flottenfahrzeuge wie beispielsweise Busse nur eine lokale und keine flächendeckende Infrastruktur erfordern und deren Auslastung sicherstellen.

### Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit war, HRS-Infrastruktur für Carsharing-, Taxi- und Busflotten sowie deren Potential und Nutzen auch für private FCEV-Fahrer zu untersuchen. Dabei sollte sowohl die Wirtschaftlichkeit der HRS sowie eine geeignete Positionierung und Verteilung von HRS für Flotten in Deutschland bestimmt werden. Insbesondere sollte ermittelt werden, ob der gemeinsame Einsatz von Flotten und HRS eine ausreichende Mindestinfrastruktur induzieren kann, die den weiteren Markthochlauf von FCEV ermöglicht.

### Wirtschaftlichkeit von HRS für Flotten

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit wurden HRS mit Onsite-Elektrolyse und Anbindung an Windenergieanlagen (WEA) für jede denkbare Kombination der gewählten Nachfrager ausgelegt. Dafür wurden bis zu 200 Carsharing-PKW, 100 Taxis und 10 Busse vorgesehen und jeweils zeitaufgelöste Nachfrageprofile erstellt. Es wurde ein Simulationsmodell einer HRS verwendet, das neben Elektrolyseur und WEA auch Wasserstoffspeicher, -verdichter und -zapfsäule abbildet. Die Auslegung erfolgte mittels Optimierung basierend auf einem Genetischen Algorithmus. Randbedingung der Auslegung war, dass nicht nur die jeweiligen Flottenfahrzeuge von der HRS versorgt werden können, sondern auch gegebenenfalls später aufkommende private Nachfrage gedeckt werden kann. Für jede Auslegung wurde die Wirtschaftlichkeit bewertet und hinsichtlich ihrer Sensitivität gegenüber verschiedenen Parametern untersucht. Es zeigte sich, dass ein wirtschaftlicher Betrieb unter den gewählten Randbedingungen nicht möglich ist, der Einsatz von Carsharing-Fahrzeugen und Taxis jedoch in vielen Fällen die Verluste reduzieren kann. Im Referenzfall ohne Flotten entstehen jährliche Verluste von 164 700 €, im günstigsten Fall mit 60 Carsharing-PKW reduzieren sich diese auf 151 700 €. Einen besonders hohen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat die Erneuerbare-Energien-Gesetz-Umlage auf Windstrom. Entfällt diese, sinken die Verluste um bis zu 47 %. Auch der Verkaufspreis von Wasserstoff hat einen bedeutenden Einfluss. Steigt dieser von  $7,98 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  auf  $10,50 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ , wird der Betrieb von HRS für verschiedene Flottenkombinationen wirtschaftlich. Werden mehrere Parameter gleichzeitig variiert, genügen geringe Anpassungen des Verkaufspreises von Wasserstoff. Gelingt es zukünftig beispielsweise, die Investitionskosten von HRS um 20 % zu senken und entfällt die Erneuerbare-Energien-Gesetz-Umlage auf Windstrom für Elektrolyse, dann genügt bereits eine Steigerung des Verkaufspreises von Wasserstoff um etwa  $0,50 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ , um einen wirtschaftlichen Betrieb zu erreichen. Eine Flotte aus 10 Bussen und 50 Taxis ermöglicht einem HRS-Betreiber in diesem Fall einen Gewinn von 11 000 € pro Jahr.

### Positionierung von HRS für Flotten und HRS-Netzwerkauslegung

Die Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit von HRS für Flotten wurden genutzt, um ein HRS-Netzwerk für Deutschland auf Basis von Flotten als Nachfrager auszulegen. Dazu war zunächst erforderlich, eine Methode zur Bewertung des Nutzens von HRS-Netzwerken zu entwickeln. Mit dieser wird gemessen, wie vielen Personen ein gegebenes HRS-Netzwerk den Umstieg auf ein FCEV erlaubt. Damit für einen Einwohner der Umstieg als möglich angesehen wird, müssen zwei Kriterien erfüllt sein. Erstens muss er im Einzugsgebiet einer HRS leben und zweitens müssen mindestens 75 % seiner Fernfahrten, deren Hinweg über die halbe Fahrzeugreichweite hinausgeht, möglich sein.

Ein Ergebnis besteht in der entwickelten Methodik, mit der die optimierte Auslegung eines HRS-Netzwerks in Deutschland möglich ist. Diese wählt in drei Schritten für jede betrachtete Stadt die Anzahl an HRS und deren Standorte zusammen mit einer

Flottenzusammensetzung aus. Dabei werden die infrastrukturellen Anforderungen der jeweiligen Flottentypen berücksichtigt und HRS so an Fernstraßen positioniert, dass sie einen möglichst hohen Nutzen für das Gesamtnetzwerk darstellen. Ziele der Optimierung sind eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit und ein möglichst hoher Nutzen des entstehenden HRS-Netzwerks für private Fahrer. Da beide Ziele nicht gleichzeitig vollumfänglich erreicht werden können, ergeben sich verschieden ausgeprägte Kompromisse zwischen diesen beiden Zielen.

Diese Methodik wurde auf fünf Szenarien angewendet, die sich hinsichtlich des Betrachtungsgebiets (12 Städte in den neuen Bundesländern oder 80 Städte im gesamten Bundesgebiet) sowie des bestehenden HRS-Netzwerks unterscheiden. Die Ergebnisse zeigten, dass mit dem gegenwärtig geplanten Ausbau des Netzwerks von insgesamt 71 HRS etwa 1,2 Mio. Menschen der Umstieg auf ein FCEV ermöglicht wird. Sollen beispielsweise 4 Mio. Personen durch eine Netzwerkerweiterung nur in den neuen Bundesländern erschlossen werden, müssen 19 zusätzliche HRS errichtet und betrieben werden, was eine jährliche Unterstützung in Höhe von etwa 3,0 Mio. € erfordert. Erfolgt der Aufbau zusätzlicher HRS für Flotten in ganz Deutschland, stehen mehr attraktive Standorte zur Verfügung, sodass für die gleiche Zahl an zu erschließenden Personen 9 HRS erforderlich sind und ein Mittelbedarf von 1,7 Mio. € pro Jahr entsteht. Insgesamt kann bis zu 17,5 Mio. Personen der Umstieg ermöglicht werden. Dafür ist eine Unterstützung von 34,5 Mio. € pro Jahr nötig. Die Analyse verschiedener Ausbaustufen des HRS-Netzwerks zeigte, dass einige Standorte für die Funktion des Netzwerks besonders wichtig sind. Dazu zählen Hagen, Halle (Saale), Jena und Würzburg. Szenarien mit einem geringeren bestehenden HRS-Netzwerk führen zu einem Ausbau vorrangig in Westdeutschland.

### **Mindestinfrastruktur**

Auf Basis der erzielten Ergebnisse und der entwickelten Methoden wurden Aussagen zur Mindestnetzwerkgröße abgeleitet. Zunächst wurde ein Kriterium für eine Mindestinfrastruktur entwickelt, die einen schrittweisen weiteren Aufbau ermöglicht. Dieses Kriterium wird als erfüllt angesehen, wenn der weit überwiegende Teil der Fernfahrten aus dem Einzugsgebiet von HRS möglich ist. Es wurde festgelegt, dass dies für 75 % bis 90 % der Landkreise gelten muss und jeweils mindestens 75 % der Fernfahrten möglich sein müssen. Das entspricht im Mittel für einen betroffenen Landkreis weit über 95 % aller Fahrten. Ein solches Mindestnetzwerk muss in Deutschland über 110 bis 170 gezielt positionierte HRS verfügen und versorgt im Idealfall 1500 bis 3500 Carsharing-Fahrzeuge und 250 bis 600 Taxis. Aufbau und Betrieb der erforderlichen, zusätzlichen 39 bis 99 HRS verursachen jährliche Verluste zwischen 6,1 Mio. € und 15,5 Mio. €. Diese Kosten sind verglichen mit anderen Infrastrukturinvestitionen gering. Beispielsweise entsprechen die Kosten bis zum Jahr 2030 nur knapp 0,7 % der Kosten für den Ausbau der Stromnetze.



# Anhang



## A. Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgestellten Methoden und Ergebnisse bilden eine Grundlage für anknüpfende Untersuchungen. Im Folgenden wird aufgezeigt, an welchen Stellen Parameter variiert oder aufbauende Fragestellungen behandelt werden können.

### **Wasserstoffbereitstellungspfad**

In dieser Arbeit wurde als Möglichkeit der Wasserstofferzeugung ausschließlich Onsite-Elektrolyse betrachtet. Weitergehende Untersuchungen könnten auch eine zentrale Elektrolyse und Wasserstoffanlieferung mittels Trailer vorsehen und die Auswirkungen auf Wasserstoffgestehungskosten sowie Wechselwirkungen mit der HRS-Netzwerkgröße betrachten. Dies ist insbesondere relevant, da die in dieser Arbeit angenommene Stromversorgung durch WEA in räumlicher Nähe eine Vereinfachung darstellt. An vielen, insbesondere großstädtischen, HRS-Standorten ist der Aufbau einer WEA in räumlicher Nähe nicht möglich. Zudem bietet eine zentrale Elektrolyse in unmittelbarer Nähe von Windparks die Möglichkeit eines sogenannten Inselbetriebs. Dabei besteht keine Verbindung der WEA und des Elektrolyseurs zum Stromnetz der öffentlichen Versorgung. In diesem Fall entfallen alle Abgaben, Umlagen und Steuern auf den selbst produzierten und verbrauchten Strom. Nachteilig ist, dass Windüberschüsse nicht verkauft und Zeiten mit nur geringem Windaufkommen nicht mittels Strombezug aus dem Netz überbrückt werden können. Eine solche Konfiguration sollte untersucht werden, um die resultierenden Wasserstoffgestehungskosten zu ermitteln und mit dem in dieser Arbeit verfolgten Ansatz zu vergleichen.

### **Weitere Flottentypen**

Die Betrachtung von Carsharing-, Taxi- und Busflotten könnte um andere Flottentypen erweitert werden. Liefer- und Verteilverkehre mit leichten Nutzfahrzeugen könnten beispielsweise eine interessante Ergänzung sein. Es muss jedoch geklärt werden, in welchem Maße sich deren Fahr- und Tankverhalten verallgemeinern und auf verschiedene Städte gleichermaßen anwenden lässt.

### **Mögliche Tankstellenpositionen**

In dieser Arbeit wurde der Aufbau von HRS auf Städte mit mindestens 100 000 Einwohnern beschränkt. Durch ihre geographische Lage können aber auch kleinere Städte oder Autobahntankstellen geeignete HRS-Standorte bieten. Als Erweiterung

## A. Ausblick

des Ansatzes dieser Arbeit könnten diese zusätzlich als mögliche Standorte vorgesehen werden.

Eine ergänzende oder alternative Erweiterung kann darin bestehen, innerhalb der Städte mögliche Tankstellenstandorte zu beschränken und beispielsweise nur Tankstellen ausgewählter Marken zuzulassen. Eine methodische Ergänzung bestünde zudem darin, den Flächenbedarf der Komponenten einer Wasserstofftankstelle und das Flächenangebot an verschiedenen möglichen HRS-Standorten zu berücksichtigen.

### **Strombezugsoptionen**

Es wurde gezeigt, dass unter den untersuchten Parametern die Strombezugskosten den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von HRS mit Onsite-Elektrolyse haben. Zukünftige Arbeiten könnten einen Schwerpunkt auf alternative Optionen zur Stromversorgung legen. Eine Kombination aus Photovoltaikanlagen und WEA könnte somit Gegenstand der Untersuchung werden. Alternativ könnte Strom aus WEA zukünftig günstiger werden, wenn Anlagen so lange in Betrieb waren, dass der Anspruch auf Einspeisevergütung nach Erneuerbare-Energien-Gesetz entfällt.

## B. Kostenparameter HRS

Die gewählten Kostenparameter der HRS-Komponenten basieren auf einer Literaturrecherche, deren Ergebnisse im Folgenden vorgestellt werden. Für die Bestimmung der Annuitäten aller Komponenten wird ein Zinssatz von 5% angenommen.

### Alkalische Elektrolyse

Eine umfassende Literaturrecherche ergab, dass viele der gesichteten Quellen zu Kosten von alkalischen Elektrolyseuren ([181]–[185]) auf Smolinka et al. (2011) [186] als Primärquelle basieren. Dabei handelt es sich wiederum um einen Überblick über unter anderem Kosten von alkalischer Druckelektrolyse, wobei die Daten aus den Jahren 2005 bis 2009 stammen und auf Angeboten und Preisanfragen beruhen. Sie gelten für das eigentliche Elektrolysesystem (ohne Skaleneffekte) ohne Speicher und Kompressoren. Zusätzlich zu dieser Quelle wird für die vorliegende Arbeit eine Studie von Noack et al. (2015) [187] herangezogen. Dort werden Angebote für Elektrolyseure mit 5 MW und 10 MW elektrischer Leistung angegeben. Diese Elektrolyseure sind zwar drucklos, in den Kostenangaben ist jedoch ein Kompressor enthalten, der den produzierten Wasserstoff auf 33 bar verdichtet. Für alle Kostenangaben dieser Quellen wird ein Inflationsausgleich für das Jahr 2016 auf Basis des Verbraucherpreisindex<sup>7</sup> [188] durchgeführt. Abbildung B.1 zeigt die Kostendaten der genannten Quellen. Für die Bestimmung einer leistungsabhängigen Kostenkurve bleiben jedoch Datenpunkte für Leistungen kleiner 50 kW sowie Punkte mit vergleichsweise hohen Kostenwerten unberücksichtigt. Somit fließen nur Punkte tendenziell geringerer spezifischer Kosten ein, da Hersteller dieser preisgünstigeren Produkte für den Aufbau einer HRS bevorzugt würden. Die sich ergebende Kostenkurve (Bestimmtheitsmaß 0,59) entspricht folgender Gleichung:

$$Capex_{Ely}(P_{Ely}) = 3013 \left( \frac{P_{Ely}}{1 \text{ kW}} \right)^{-0.115} \cdot \text{€} \quad (\text{B.1})$$

mit

$$\begin{aligned} Capex_{Ely} &= \text{Capex eines Elektrolyseurs in €} \\ P_{Ely} &= \text{Elektrische Nennleistung des Elektrolyseurs in kW} \end{aligned}$$

Die Ergebnisse wurden mit Angaben eines Experten eines Elektrolyseherstellers abgeglichen, um Validität zu gewährleisten. Fixe Betriebskosten ( $Opex_{\text{fix}}$ ) werden bezogen

## B. Kostenparameter HRS

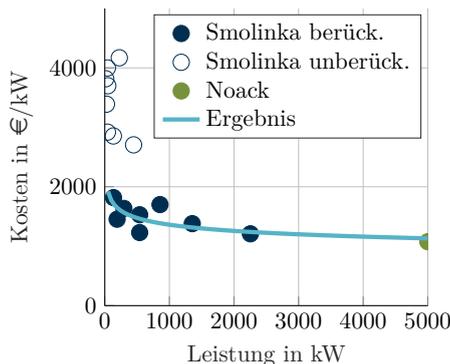


Abbildung B.1.: Literaturwerte zu Elektrolysekosten [186], [187]

auf die Investitionsausgaben (Capex) in [189] mit  $4\frac{\%}{a}$  und in [190] mit  $5\frac{\%}{a}$  angegeben. Für diese Arbeit wird der niedrigere Wert verwendet. Zur Lebensdauer finden sich in [186] Angaben zwischen 20 und 30 Jahre, wobei diese teils eine Überholung vorsehen. Bertuccioli et al. (2014) [183] schätzen die Lebensdauer auf 25 Jahre. Für die vorliegende Arbeit werden 20 Jahre angenommen.

## Wasserstoffspeicher

Es gibt in der Literatur zwar zahlreiche Angaben zu Wasserstoffspeicherkosten, allerdings wird nicht immer ausgewiesen, auf welche Speicherkapazität und welches Druckniveau sich die Angaben beziehen. Diese Arbeit stützt sich deshalb auf Daten aus [191], [192] und [181], für die diese Bezugswerte angegeben werden. Für alle Kostenangaben wird ein Inflationsausgleich auf Basis von [188] und eine Währungsumrechnung auf Basis von [193] durchgeführt, sodass sich alle Angaben danach auf Euro im Jahr 2016 beziehen. Abbildung B.2 zeigt die verwendeten Datenpunkte. Aus der sich ergebenden Kostenkurve (Bestimmtheitsmaß 0,94) werden für die drei in dieser Arbeit verwendeten Druckniveaus spezifische Speicherkosten abgeleitet, in der Abbildung als Ergebnis bezeichnet.

$Opex_{fix}$  für Wasserstoffspeicher betragen bezogen auf die Capex gemäß [181]  $2\frac{\%}{a}$  und laut [190]  $1\frac{\%}{a}$ . Es wird der niedrigere Wert gewählt. Für Niederdruckspeicher (NDS) wird in [181] eine Lebensdauer von 30 Jahren angegeben, die in dieser Arbeit auch für Mitteldruckspeicher (MDS) angenommen wird. Für Hochdruckspeicher (HDS) wird davon abweichend eine Lebensdauer von 20 Jahren angenommen, da hier das Druckniveau erheblich höher ist und durch die Pufferfunktion mehr vollständige Be- und Entladezyklen als bei den anderen Speichern erwartet werden.

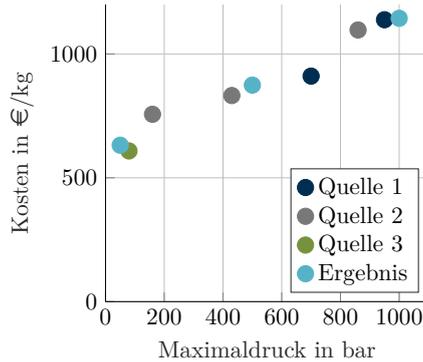


Abbildung B.2.: Literaturwerte zu Speicherkosten. Quelle 1: [191], Quelle 2: [192], Quelle 3: [181]

## Wasserstoffverdichter

Nur wenige Quellen liefern ausreichende Informationen zu Kosten von Wasserstoffverdichtern. Häufig fehlen Angaben zu Ausgangsdruckniveau und förderbarem Massenstrom. Deshalb basieren die in dieser Arbeit getroffenen Annahmen auf zwei in dieser Hinsicht vollständigen Literaturangaben. Diese werden auf Basis von [193] und [188] in Euro im Jahr 2016 umgerechnet. Für einen Hochdruckverdichter mit einem maximalen Massenstrom von etwa  $33 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  geben Pratt et al. (2015) [194] umgerechnet  $389\,636 \text{ €}$  Capex an. Parks et al. (2014) [195] weisen für diesen Fall  $394\,398 \text{ €}$  aus. In dieser Quelle werden für einen Mitteldruckverdichter und einen Massenstrom von  $35 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  Capex in Höhe von  $316\,384 \text{ €}$  angegeben. Die in dieser Quelle genannten Werte werden für die vorliegende Arbeit verwendet, da sie konform zu einer Expertenmeinung eines Verdichterherstellers sind.

$\text{Opex}_{\text{fix}}$  werden bezogen auf Capex in [185] mit 4 % für Verdichter mit bis zu 200 bar Ausgangsdruck angegeben. Andere Quellen weisen 5 % aus [190], [196]. Dieser Wert wird in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Als Lebensdauer werden 20 Jahre angenommen.

## Wasserstoffkühlung

In der Literatur finden sich Kostenangaben für die Wasserstoffkühlung auf Basis von Herstellerangeboten aus dem Jahr 2009 [197]. Unter Berücksichtigung der Inflation [188] bis zum Jahr 2016 ergeben sich Capex in Höhe von  $141\,300 \text{ €}$ . Eine amerikanische Quelle [198] gibt Capex an, die sich nach Berücksichtigung von Wechselkurs [193]

## B. Kostenparameter HRS

und Inflation auf 135 900 € belaufen. Für diese Arbeit wird ein Wert von 140 000 € verwendet.

Opex<sub>fix</sub> werden gemäß [190] mit 5 % und die Lebensdauer wird mit 20 Jahren angenommen.

## Wasserstoffzapsäule

Kosten für Wasserstoffzapsäulen werden häufig gemeinsam für Zapsäule und Kühlung angegeben. Deshalb werden in diesen Fällen die angenommenen Kosten für die Wasserstoffkühlung in Höhe von 140 000 € abgezogen. Die Kostenangaben streuen, sodass sich nach Berücksichtigung von Inflation [188] und Währung [193] Capex von 107 000 € [195], 126 000 € [190], 149 000 € [198] und 263 000 € [198] ergeben. Da der günstigste Wert auf einem tatsächlichen Angebot beruht, wird für diese Arbeit dieser Wert sowohl für PKW- als auch für Bus-Zapsäulen gewählt.

Opex<sub>fix</sub> werden gemäß [190] mit 5 % und die Lebensdauer zu 20 Jahren angenommen.

## Windenergieanlage

Capex und Opex<sub>fix</sub> für WEA werden aus einem Bericht der Deutschen Windguard entnommen [151]. Es werden die Werte für Anlagen mit 2 bis 3 MW Nennleistung und eine Nabenhöhe zwischen 100 und 120 m verwendet. Gemeinsam mit den Investitionsnebenkosten ergeben sich Capex in Höhe von 1547  $\frac{\text{€}}{\text{kW}}$  und Opex<sub>fix</sub> von 56  $\frac{\text{€}}{\text{kW a}}$ . Die Lebensdauer wird gemäß [199] mit 20 Jahren angenommen.

## Planung, Genehmigung, Aufbau

Ein nicht unbeträchtlicher Teil der Gesamtkosten entfällt auf Kosten für Planung, Genehmigung und Aufbau der Wasserstofftankstellenkomponenten. In der Literatur werden diese häufig in Relation zu den Capex angegeben. Die Werte für diese zusätzlichen Kosten liegen zwischen 40 % [198] für eine HRS mit Onsite-Elektrolyse und 100 % [195], [198]. Da in dieser Arbeit HRS mit Onsite-Elektrolyse betrachtet werden, wird entsprechend von einem Kostenaufschlag in Höhe von 40 % der Capex der HRS mit Elektrolyse aber ohne WEA ausgegangen.

## C. Bestimmung von Wasserstoffgestehungskosten

Die Wasserstoffgestehungskosten, Englisch: Levelized Cost of Hydrogen (LCOH<sub>2</sub>) werden bestimmt, indem die äquivalenten jährlichen Kosten auf die produzierte Wasserstoffmasse bezogen werden. Die äquivalenten jährlichen Kosten wiederum werden mittels der Annuitätenmethode bestimmt:

$$LCOH_2 = \frac{AEJK}{m_{H_2}} \quad (C.1)$$

$$AEJK = Capex \cdot KWF + Opex_{fix} + Opex_{var} \quad (C.2)$$

$$KWF = \frac{r \cdot (1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \quad (C.3)$$

mit

- $LCOH_2$  = Wasserstoffgestehungskosten in  $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$
- $m_{H_2}$  = Produzierte Wasserstoffmasse in kg
- $AEJK$  = Äquivalente jährliche Kosten in €
- $KWF$  = Kapitalwiedergewinnungsfaktor
- $r$  = Zinssatz
- $t$  = Nutzungsdauer in Jahren



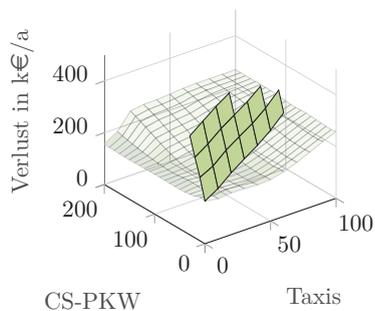
## D. Anhang zu Kapitel 5

In Kapitel 5.2.3 wird die Sensitivität der HRS-Wirtschaftlichkeit gegenüber verschiedenen Einflussgrößen untersucht. In diesem Abschnitt werden nun ergänzend die Auswirkungen weiterer Einflussgrößen dargestellt.

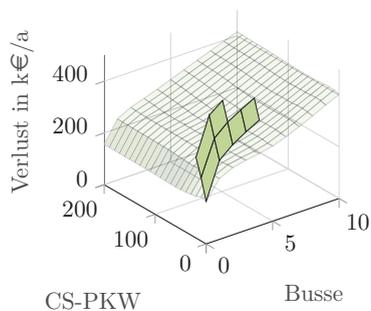
### Sensitivitätsanalyse: Einfluss der Fahrzeugmehrkosten

Im Folgenden werden die Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der HRS gezeigt, wenn die Mehrkosten für Fahrzeuganschaffung und -betrieb ebenfalls vom HRS-Betreiber zu tragen wären.

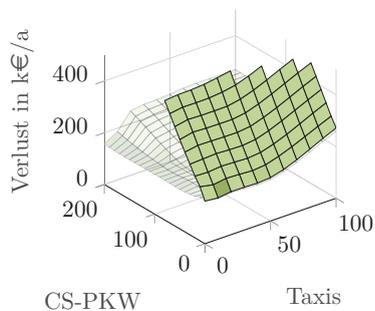
Betrachtet man das Gesamtsystem aus HRS und Flottenfahrzeugen, so entstehen bei der Umstellung auf Wasserstoff als Kraftstoff nicht nur Mehrkosten für den Aufbau und den Betrieb der HRS, sondern gegebenenfalls auch für die Anschaffung und den Betrieb der FCEV. Nimmt man an, dass Tankstelle und Fahrzeuge von demselben Unternehmen betrieben werden, so können die Fahrzeugmehrkosten in die Verlustberechnung mit aufgenommen werden. Für einen Vergleich zwischen BEV und FCEV werden daher die in Kapitel 4 genannten Fahrzeug- und Energiekosten sowie Kraftstoff- und Energieverbräuche zugrunde gelegt. Abbildung D.1 zeigt die resultierenden jährlichen Verluste. Die Verluste steigen gegenüber dem Referenzfall schon für geringe Flottengrößen stark an. Geht man allerdings von einer Kostenreduktion der FCEV von 25 % aus (siehe Abbildungen D.1c und D.1d), so zeigt sich, dass der Fall S0-T10-B0 um 3 % geringere Verluste als der Fall ohne Flotten aufweist. Das bedeutet, dass es aus Sicht des HRS-Betreibers vorteilhaft ist, die HRS (unter Inkaufnahme von Mehrkosten) größer zu dimensionieren und zusätzlich die Mehrkosten von 10 Taxis zu tragen, statt eine kleiner dimensionierte HRS zu errichten und auf das Aufkommen privater Nachfrage zu warten. Für den Fall von Carsharing-Fahrzeugen gilt dies nicht, da hier die geringere Wasserstoffnachfrage je Fahrzeug keine Kompensation der Mehrkosten erlaubt. Eine entsprechende Kostenreduktion der Busse führt dazu, dass die Kosten im Vergleich zu BEV-Bussen geringer sind — die Fahrzeugmehrkosten sind also negativ. Folglich zeigt das Diagramm eine entsprechende Reduktion der Verluste des HRS-Betriebs, die jedoch nicht das Niveau des Referenzfalls erreichen.



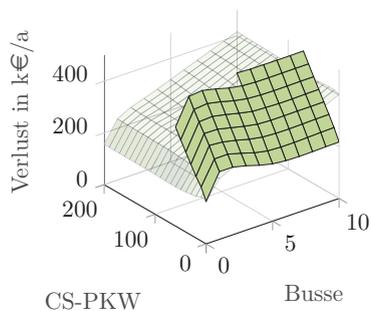
(a) Ohne Busse



(b) Ohne Taxis



(c) Ohne Busse, bei Kostenreduktion der FCEV um 25 %



(d) Ohne Taxis, bei Kostenreduktion der FCEV um 25 %

Abbildung D.1.: Jährliche Verluste des HRS-Betriebs bei Berücksichtigung etwaiger Fahrzeug- und Energiemehrkosten gegenüber BEV. Die Referenzwerte sind transparent dargestellt und Beträge über  $500\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}}$  sind ausgeblendet

## Sensitivitätsanalyse: Einfluss der WEA-Volllaststunden

In dieser Arbeit werden für die betrachteten WEA 2700 Volllaststunden pro Jahr angenommen. Dies entspricht den erwarteten Volllaststunden der im Jahr 2017 neu installierten WEA [150]. Es ist jedoch möglich, dass an einigen Standorten nur eine geringere Zahl an Volllaststunden erreicht werden kann. Dies gilt insbesondere, wenn die Auswahl der Standorte dadurch eingeschränkt ist, dass die WEA in örtlicher Nähe zu einer HRS mit Elektrolyse errichtet werden sollen. Deshalb wird im Folgenden untersucht, wie sich eine Verringerung der Volllaststunden auf 2000 pro Jahr auf die Wirtschaftlichkeit des HRS-Betriebs auswirkt (siehe Abbildung D.2). Man kann erkennen, dass sich die Wirtschaftlichkeit teils deutlich verschlechtert und dieser Einfluss bei größeren Flotten zunimmt. Die jährlichen Verluste steigen im Fall S0-T100-B10 (außerhalb des in der Grafik angezeigten Bereichs) um 60 % und in den Fällen S0-T0-B10 (außerhalb des in der Grafik angezeigten Bereichs) und S0-T100-B0 um 53 % und 42 %. Der Fall ohne Flotten (S0-T0-B0) bleibt unbeeinflusst, da hier keine WEA vorgesehen werden.

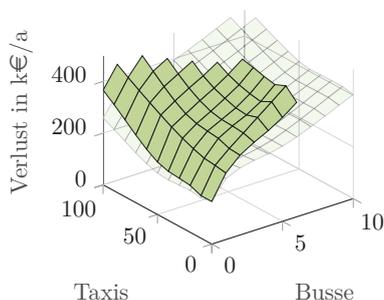


Abbildung D.2.: Sensitivität der jährlichen Verluste des HRS-Betriebs gegenüber einer Reduktion der jährlichen Volllaststunden der WEA auf 2000. Die Referenzwerte sind transparent dargestellt und Beträge über 500 000  $\frac{\text{€}}{\text{a}}$  sind ausgeblendet

## Sensitivitätsanalyse: Einfluss der Komponentenkosten

In Kapitel 5.2.3 wird bereits die Sensitivität der HRS-Wirtschaftlichkeit gegenüber den Kapital- und fixen Betriebskosten der HRS-Komponenten (WEA ausgenommen) untersucht. Während dort die Ergebnisse allerdings für alle Komponenten zusammengefasst gezeigt werden, werden im Folgenden Komponentengruppen getrennt untersucht und dargestellt.

Abbildung D.3 zeigt die Sensitivität der Wirtschaftlichkeit gegenüber einer Reduktion der fixen Betriebs- und Kapitalkosten ausgewählter Komponenten um jeweils 20%.

Variable Betriebskosten werden nicht variiert. Der Elektrolyseur bildet eine eigene Gruppe, die Hoch- und Mitteldruckverdichter sowie die Nieder-, Mittel- und Hochdruckspeicher werden ebenso wie die Zapfsäule und Vorkühlung jeweils gemeinsam betrachtet. Man erkennt, dass die Kosten des Elektrolyseurs unter den untersuchten Komponentengruppen den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben (Abbildung D.3a). Hier kann der Verlust beispielsweise im Fall S0-T100-B10 um 11 %, im Fall S0-T0-B10 um 10 % und im Fall S0-T100-B0 um 9 % reduziert werden. Werden die Verdichterkosten reduziert (Abbildung D.3b), verringern sich die Verluste in den Beispielfällen um 7 % (S0-T100-B10), 6 % (S0-T0-B10) und 10 % (S0-T100-B0). Am meisten profitiert also die Flottenkombination ohne Busse. Die entsprechenden Reduktionen im Fall verringerter Speicherkosten belaufen sich auf 8 %, 9 % und 3 % (Abbildung D.3c). Die größten Auswirkungen zeigen sich hier umgekehrt für Flottenkombinationen mit Bussen. Die geringsten Auswirkungen hat eine Kostenreduktion der Zapfsäulen und Vorkühlung (Abbildung D.3d). In allen Beispielfällen können die Verluste in diesem Fall um 4 % reduziert werden.

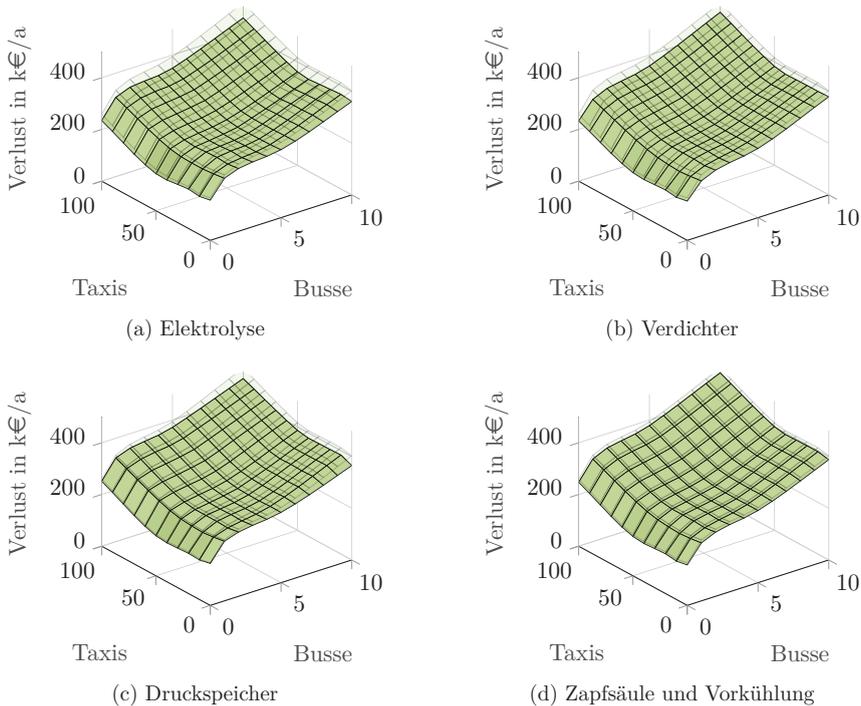


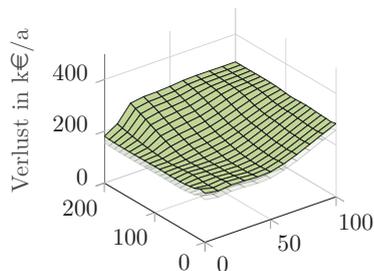
Abbildung D.3.: Sensitivität der jährlichen Verluste des HRS-Betriebs gegenüber einer Reduktion der fixen Betriebs- und der Kapitalkosten ausgewählter Komponenten um 20%. Die Referenzwerte sind transparent dargestellt

## Sensitivitätsanalyse: Einfluss der Kosten für eine Neuverlegung eines Erdkabels

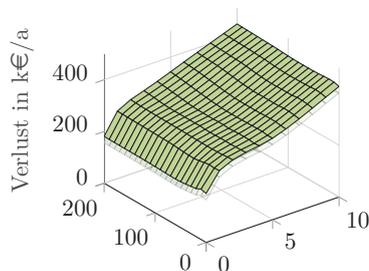
Es wird angenommen, dass die HRS von WEA versorgt wird, die sich in unmittelbarer Nähe befinden per Direktleitung angebunden sind. Tatsächlich ist gerade bei urbanen HRS unwahrscheinlich, dass WEA in direkter Nähe zur HRS aufgebaut werden können. Soll auch im Falle einer einige Kilometer entfernten WEA eine Eigenversorgung ermöglicht werden, so muss ein Erdkabel verlegt werden. Damit verbundene Kosten betragen laut Robinius et al. (2018) [149] zwischen  $65\,000 \frac{\text{€}}{\text{km}}$  und  $140\,000 \frac{\text{€}}{\text{km}}$ . Legt man eine Nutzungsdauer des Erdkabels von 20 Jahren sowie einen Zinssatz von 5% zugrunde, so ergeben sich äquivalente jährliche Kosten zwischen  $5216 \frac{\text{€}}{\text{km}}$  und  $11\,234 \frac{\text{€}}{\text{km}}$ . Abbildung D.4 zeigt für das arithmetische Mittel aus dieser Spanne ( $8225 \frac{\text{€}}{\text{km}}$ ) den Einfluss eines Erdkabels auf die Wirtschaftlichkeit für 3 km (Abbildung-

D. Anhang zu Kapitel 5

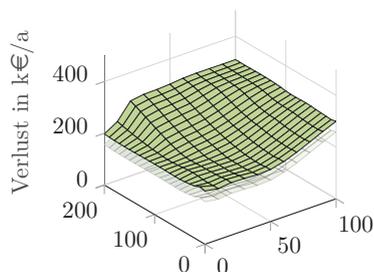
gen D.4a und D.4b) und 5 km (Abbildungen D.4c und D.4d). Die jährlichen Verluste steigen bei 3 km Kabellänge um 24 675 € entsprechend zwischen 6 % (HRS für die größte untersuchte Flotte) und 16 % (HRS für die kleinste untersuchte Flotte). Für eine Kabellänge von 5 km steigen die jährlichen Verluste um 41 125 €, was zwischen 10 % (HRS für die größte untersuchte Flotte) und 27 % (HRS für die kleinste untersuchte Flotte) entspricht.



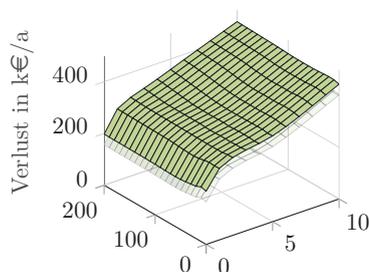
CS-PKW Taxis  
(a) Ohne Busse, 3 km Kabellänge



CS-PKW Busse  
(b) Ohne Taxis, 3 km Kabellänge



CS-PKW Taxis  
(c) Ohne Busse, 5 km Kabellänge

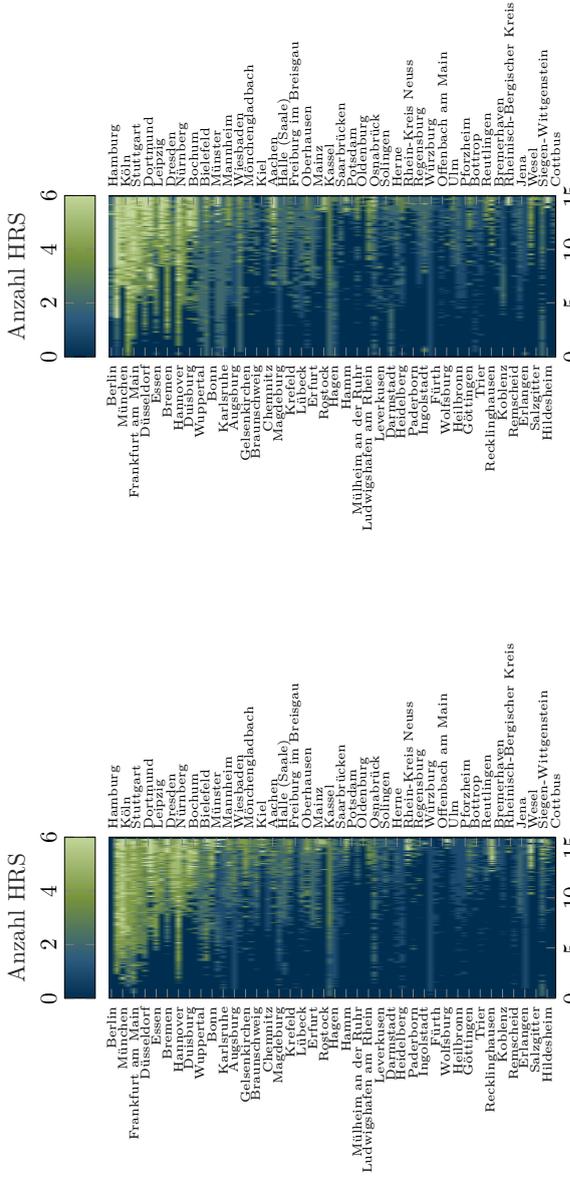


CS-PKW Busse  
(d) Ohne Taxis, 5 km Kabellänge

Abbildung D.4.: Sensitivität der jährlichen Verluste des HRS-Betriebs gegenüber den Kosten für eine Erdkabelverlegung. Die Referenzwerte sind transparent dargestellt

## **E. Anhang zu Kapitel 6**

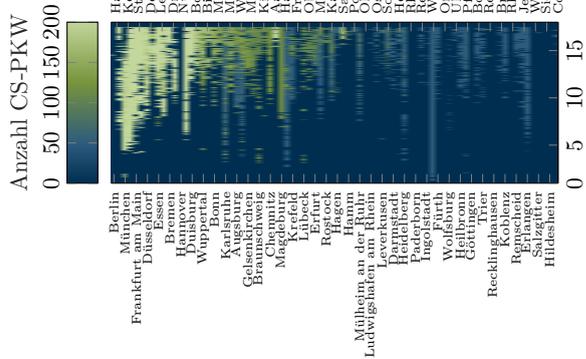
In diesem Abschnitt werden ergänzende Ergebnisgrafiken zum dritten Optimierungsschritt aus Kapitel 6.3.3 gezeigt. Diese betreffen die Eigenschaften der Pareto-Fronten und zeigen für jede Stadt und jedes Element der Pareto-Front, wie viele HRS und Fahrzeuge vorgesehen werden. Für Szenario 2a werden nur die Ergebnisse dargestellt, die nicht bereits im Hauptteil gezeigt wurden.



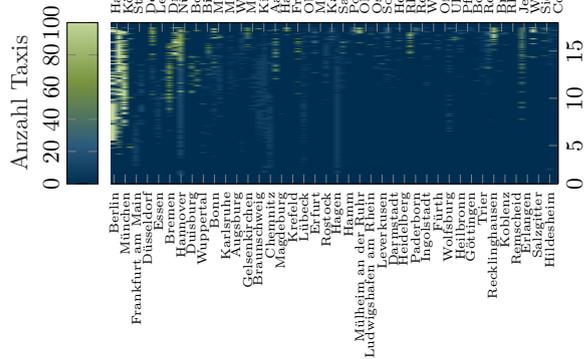
(a) Szenario 2b

(b) Szenario 2c

Abbildung E.1.: Szenarien 2b und 2c: Anzahl HRS



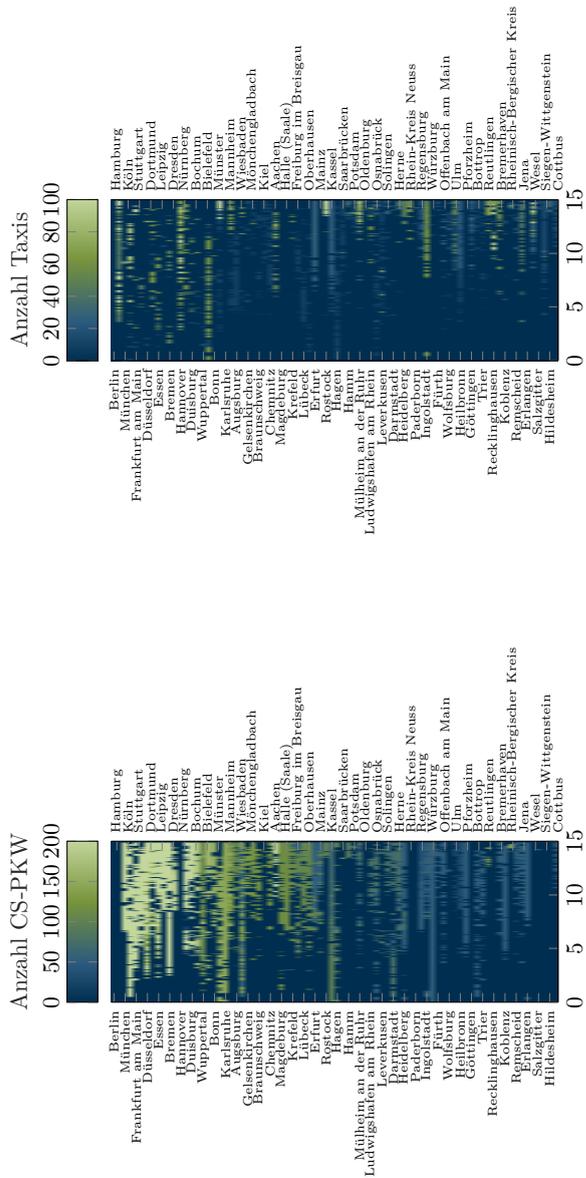
Erschlossene Bevölkerung in Mio.



Erschlossene Bevölkerung in Mio.

Abbildung E.2.: Szenario 2a: Anzahl Carsharing-Fahrzeuge und Taxis





Erschlossene Bevölkerung in Mio.

Abbildung E.4.: Szenario 2c: Anzahl Carsharing-Fahrzeuge und Taxis

Erschlossene Bevölkerung in Mio.



## F. Abkürzungsverzeichnis

<b>BEV</b>	batterieelektrisches Fahrzeug
<b>Capex</b>	Investitionsausgaben
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>EEG</b>	Erneuerbare-Energien-Gesetz
<b>FCEB</b>	Brennstoffzellenbus, Englisch: Fuel Cell Electric Bus
<b>FCEV</b>	Brennstoffzellenfahrzeug, Englisch: Fuel Cell Electric Vehicle
<b>HDS</b>	Hochdruckspeicher
<b>HRS</b>	Wasserstofftankstelle, Englisch: Hydrogen Refueling Station
<b>LCOH<sub>2</sub></b>	Wasserstoffgestehungskosten, Englisch: Levelized Cost of Hydrogen
<b>MDS</b>	Mitteldruckspeicher
<b>NDS</b>	Niederdruckspeicher
<b>Opex<sub>var</sub></b>	variable Betriebskosten
<b>Opex<sub>fix</sub></b>	fixe Betriebskosten
<b>PtG</b>	Power-to-Gas
<b>PtL</b>	Power-to-Liquid
<b>THG</b>	Treibhausgas
<b>WEA</b>	Windenergieanlage



## G. Abbildungsverzeichnis

1.1.	Schematische Darstellung einer Wasserstoff-Initialzelle . . . . .	3
1.2.	Überblick über die Hauptteile der Arbeit und deren Verknüpfung . . . . .	4
2.1.	Treibhausgasemissionen und Minderungsziele sowie Fahrleistungen und Prognosen . . . . .	7
2.2.	Mögliche Tankstellenkonfigurationen . . . . .	11
2.3.	Entwicklung, Bestand und Position von Tankstellen und HRS . . . . .	13
3.1.	Beispielhaftes Optimierungsergebnis: Pareto-Front . . . . .	44
4.1.	Verknüpfung des Kapitels 4 mit den übrigen Kapiteln . . . . .	47
4.2.	Saisonale Tankwahrscheinlichkeit von PKW . . . . .	50
4.3.	Stündliche Tankwahrscheinlichkeit für PKW . . . . .	51
4.4.	Wasserstoffnachfrage (Klasse „Very small“) in einer Beispielwoche . . . . .	53
4.5.	Wasserstoffnachfrage in einer Beispielwoche für eine Flotte von 5 Bussen . . . . .	58
4.6.	Stündliche Tankwahrscheinlichkeit für Taxis . . . . .	61
4.7.	Wasserstoffnachfrage in einer Beispielwoche für eine Flotte von 50 Taxis . . . . .	63
4.8.	Stündliche Tankwahrscheinlichkeit für Carsharing-Fahrzeuge . . . . .	68
4.9.	Wasserstoffnachfrage in einer Beispielwoche für 50 Carsharing-Fahrzeuge . . . . .	69
5.1.	Verknüpfung des Kapitels 5 mit den übrigen Kapiteln . . . . .	73
5.2.	Schematische Darstellung der Komponenten des Simulationsmodells . . . . .	76
5.3.	Pareto-Front der Flottenkombination S20-T20-B1 . . . . .	82
5.4.	Netto-H <sub>2</sub> -Gestehungskosten (LCOH <sub>2</sub> ) für den Fall ohne private Nachfrage und verschiedene Flottenkombinationen . . . . .	85
5.5.	Optimierungsergebnis: Auslegungsparameter für verschiedene Flottenkombinationen . . . . .	87
5.6.	Netto-H <sub>2</sub> -Gestehungskosten für den Fall mit privater Nachfrage . . . . .	88
5.7.	Netto-H <sub>2</sub> -Gestehungskosten für verschiedene Optimierungsziele . . . . .	89
5.8.	Jährliche Verluste des HRS-Betriebs . . . . .	90
5.9.	Jährliche Verluste des HRS-Betriebs im Falle privater Nachfrage . . . . .	91
5.10.	Netto-H <sub>2</sub> -Gestehungskosten ohne Windenergieanlagen . . . . .	92
5.11.	Jährliche Verluste des HRS-Betriebs bei geringerer Überdimensionierung . . . . .	93
5.12.	Jährliche Verluste des HRS-Betriebs für verschiedene H <sub>2</sub> -Verkaufspreise . . . . .	95
5.13.	Sensitivität der jährlichen Verluste des HRS-Betriebs gegenüber verschiedenen Parametern . . . . .	96

## G. Abbildungsverzeichnis

5.14. Sensitivität der jährlichen Verluste des HRS-Betriebs gegenüber je zwei Parametern . . . . .	97
5.15. Sensitivität der jährlichen Verluste des HRS-Betriebs gegenüber je zwei Parametern . . . . .	98
5.16. Sensitivität der jährlichen Verluste des HRS-Betriebs gegenüber je drei Parametern . . . . .	99
6.1. Verknüpfung des Kapitels 6 mit den übrigen Kapiteln . . . . .	103
6.2. Beispielhaftes Optimierungsergebnis mit Pareto-Front (blau) . . . . .	104
6.3. Schematische Darstellung der Optimierungsmethodik . . . . .	107
6.4. Szenarien 1a und 1b: Städte und bestehende HRS . . . . .	124
6.5. Szenarien 2a bis c: Städte und bestehende HRS . . . . .	126
6.6. Szenarien 1a und 1b: Erfasste Bevölkerung je HRS . . . . .	128
6.7. Szenarien 1a und 1b: Erforderliche HRS-Anzahl . . . . .	130
6.8. Szenario 1a, Berlin: HRS-Positionen . . . . .	131
6.9. Szenario 1a, Dresden: HRS-Positionen . . . . .	132
6.10. Szenario 2a, Köln: HRS-Positionen . . . . .	134
6.11. Szenario 1a: Pareto-Fronten für Berlin und Dresden, Anzahl HRS . . . . .	136
6.12. Szenario 1a: Pareto-Fronten für Berlin und Dresden, Anzahl Fahrzeuge . . . . .	137
6.13. Szenarien 1a und 1b: Pareto-Fronten, Anzahlen HRS und Fahrzeuge . . . . .	139
6.14. Szenario 1a: Eigenschaften der Pareto-Front . . . . .	141
6.15. Szenario 1a: HRS-Netzwerk für ausgewählte Punkte der Pareto-Front . . . . .	143
6.16. Szenarien 2a, 2b und 2c: Pareto-Fronten, Anzahlen HRS und Fahrzeuge . . . . .	145
6.17. Szenario 2a: Anzahl der HRS je Stadt für Elemente der Pareto-Front . . . . .	147
6.18. Szenario 2a: HRS-Netzwerk für ausgewählte Punkte der Pareto-Front . . . . .	148
6.19. Szenarien 2a, 2b, 2c: Vergleich des HRS-Netzwerks . . . . .	150
6.20. Anteil Landkreise, für die genügend Fahrten möglich sind . . . . .	152
6.21. Vergleich von Literaturangaben zur Mindestinfrastruktur . . . . .	159
B.1. Literaturwerte zu Elektrolysekosten . . . . .	172
B.2. Literaturwerte zu Speicherkosten . . . . .	173
D.1. Jährliche Verluste des HRS-Betriebs bei Berücksichtigung von Fahrzeugkosten . . . . .	178
D.2. Sensitivität der jährlichen Verluste des HRS-Betriebs gegenüber verringerten WEA-Volllaststunden . . . . .	179
D.3. Sensitivität der jährlichen Verluste des HRS-Betriebs gegenüber verschiedenen Parametern . . . . .	181
D.4. Sensitivität der jährlichen Verluste des HRS-Betriebs gegenüber Kosten für Erdkabel . . . . .	182
E.1. Szenarien 2b und 2c: Anzahl HRS . . . . .	184
E.2. Szenario 2a: Anzahl Carsharing-Fahrzeuge und Taxis . . . . .	185
E.3. Szenario 2b: Anzahl Carsharing-Fahrzeuge und Taxis . . . . .	186
E.4. Szenario 2c: Anzahl Carsharing-Fahrzeuge und Taxis . . . . .	187

## H. Tabellenverzeichnis

4.1. Ausgewählte Eigenschaften der HRS-Klassen gemäß H2 Mobility . . .	49
4.2. Kostenvergleich und Verbrauchskennzahlen für Brennstoffzellenbusse, batterieelektrische Busse und Dieselbusse . . . . .	59
4.3. Eigenschaften verschiedener Taxi-Flottengrößen . . . . .	62
4.4. Kostenvergleich und Verbrauchskennzahlen für FCEV-, BEV- und Die- sel-PKW . . . . .	64
4.5. Abschätzung der Jahresfahrleistung von Carsharing-Fahrzeugen . . . .	67
4.6. Kostenvergleich und Verbrauchskennzahlen für FCEV-, BEV-, Diesel- und Benzin-PKW . . . . .	70
5.1. Kosten und Lebensdauer der Systemkomponenten, Prozentangaben beziehen sich auf Capex . . . . .	79
5.2. Entscheidungsvariablen sowie ihre Bereiche und Schrittweiten . . . . .	80
5.3. Entscheidungsvariablen der Punkte der Pareto-Front von Flottenkom- bination S20-T20-B1 . . . . .	82
6.1. Anzahl der Flottenfahrzeuge im Betrachtungsgebiet der Szenarien 1a und 1b . . . . .	123
6.2. Berücksichtigte Städte der Szenarien 2a, 2b und 2c . . . . .	125
6.3. Szenarienübersicht . . . . .	127



# I. Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur. *Verkehr in Zahlen 2017/2018*. 2018.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. *Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. 2016.
- [3] Europäische Kommission. *Pressemitteilung: Luftverschmutzung durch Stickstoffdioxid: Kommission droht Deutschland mit Klage*. [https://ec.europa.eu/germany/news/luftverschmutzung-durch-stickstoffdioxid-kommission-droht-deutschland-mit-klage\\_de](https://ec.europa.eu/germany/news/luftverschmutzung-durch-stickstoffdioxid-kommission-droht-deutschland-mit-klage_de). Feb. 2017.
- [4] Bundesverwaltungsgericht. *Pressemitteilung: Luftreinhaltepläne Düsseldorf und Stuttgart: Diesel-Verkehrsverbote ausnahmsweise möglich*. <https://www.bverwg.de/pm/2018/9>. Feb. 2018.
- [5] Toyota. *Website*. <https://www.toyota.de/automobile/der-toyota-mirai.json>. Feb. 2018.
- [6] *Hyundai unveils next-gen FCEV NEXO at CES plus home power*. Fuel Cells Bulletin (2018).
- [7] H2 Mobility GmbH & Co. KG. *Website*. [h2-mobility.de](http://h2-mobility.de). Dez. 2017.
- [8] United Nations. *Paris Agreement*. 2015.
- [9] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014 - Mitigation of Climate Change*. 2014.
- [10] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. *Erneuerbare Energien in Zahlen 2016*. 2017.
- [11] Umweltbundesamt. *Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 - 2016*. 2018.
- [12] Deutsche Bundesregierung. *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. 2010.
- [13] Intraplan Consult GmbH und BVU Beratergruppe Verkehr+Umwelt GmbH. *Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2030, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*. 2014.
- [14] Weltgesundheitsorganisation. *Economic cost of the health impact of air pollution in Europe*. 2016.

## I. Literaturverzeichnis

- [15] Umweltbundesamt. *Luftqualität 2017 - Vorläufige Auswertung*. 2018.
- [16] K. Giering. *Lärmwirkungen: Dosis-Wirkungsrelationen*. Fachhochschule Trier im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2010.
- [17] Umweltbundesamt. *Zusammenstellung der Mitteilungen der Bundesländer und des Eisenbahn-Bundesamtes entsprechend § 47c BImSchG (Stand 29.02.2016)*. 2016.
- [18] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. *Umweltbewusstsein in Deutschland 2016*. 2017.
- [19] Mineralölwirtschaftsverband e.V. *Amtliche Mineralölkosten für die Bundesrepublik Deutschland*. 2016.
- [20] Agora Verkehrswende. *Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende*. 2017.
- [21] S. Schiebahn, T. Grube, M. Robinius, V. Tietze, B. Kumar und D. Stolten. *Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany*. International Journal of Hydrogen Energy 40.12 (2015), S. 4285–4294.
- [22] Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics. *Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe*. 2018.
- [23] Sachverständigenrat für Umweltfragen. *Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor*. 2017.
- [24] V. Quaschnig. *Sektorkopplung durch die Energiewende*. Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin, 2016.
- [25] S. Schiebahn, T. Grube, M. Robinius, L. Zhao, A. Otto, B. Kumar, M. Weber und D. Stolten. *Power to Gas*. In: Transition to Renewable Energy Systems. Wiley-Blackwell, 2013. Kap. 39, S. 813–848.
- [26] D. Stolten, B. Emonts, T. Grube und M. Weber. *Hydrogen as an Enabler for Renewable Energies*. In: Transition to Renewable Energy Systems. Wiley-Blackwell, 2013. Kap. 12.
- [27] A. Götz. *Zukünftige Belastungen von Niederspannungsnetzen unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität*. Diss. Technische Universität Chemnitz, 2016.
- [28] W.-P. Schill und C. Gerbaulet. *Power system impacts of electric vehicles in Germany: Charging with coal or renewables?*. Applied Energy 156 (2015), S. 185–196.
- [29] CDU, CSU und SPD. *Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD, 19. Legislaturperiode. Ein neuer Aufbruch für Europa, eine neue Dynamik für Deutschland, ein neuer Zusammenhalt für unser Land*. 2018.

- [30] M. Robinius, J. Linßen, T. Grube, M. Reuß, P. Stenzel, K. Syranidis, P. Kuckertz und D. Stolten. *Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles*. Bd. 408. Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment. Jülich, 2018.
- [31] P. Froeschle und J. Wind. *Hydrogen and Fuel Cells*. In: Hrsg. von D. Stolten. Bd. 1. 12. Wiley-VCH, 2013. Kap. Fuel Cell Power Trains, S. 793–810.
- [32] H. Barthelemy, M. Weber und F. Barbier. *Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives*. International Journal of Hydrogen Energy 42.11 (2017). Special issue on The 6th International Conference on Hydrogen Safety (ICHS 2015), 19–21 October 2015, Yokohama, Japan, S. 7254–7262.
- [33] Kraftfahrt-Bundesamt. *Bestand an Kraftfahrzeugen mit der Antriebsart Brennstoffzelle mit Primärenergie Wasserstoff am 01.01.2017*. Mitteilung auf Anfrage. Jan. 2017.
- [34] K. Müller, F. Schnitzeler, A. Lozanovski, S. Skiker und M. Ojakovoh. *Clean Hydrogen in European Cities — Final Report*. Daimler Buses - EvoBus GmbH, 2017.
- [35] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel und D. Stolten. *A comprehensive review on PEM water electrolysis*. International Journal of Hydrogen Energy 38.12 (2013), S. 4901–4934.
- [36] D. Stolten und D. Krieg. *Alkaline Electrolysis – Introduction and Overview*. In: 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 — WHEC 2010: Parallel Sessions Book 3: Hydrogen Production Technologies — Part 2, Essen. Hrsg. von T. Grube und D. Stolten. Bd. 78,3. Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Energie und Umwelt / Energy und Environment. 16. Mai 2010, VII, S. 636.
- [37] C. Yang und J. Ogden. *Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode*. International Journal of Hydrogen Energy 32.2 (2007), S. 268–286.
- [38] S. Shayegan, P. J. Pearson und D. Hart. *Hydrogen for buses in London: A scenario analysis of changes over time in refuelling infrastructure costs*. International Journal of Hydrogen Energy 34.19 (2009), S. 8415–8427.
- [39] S. D. Stephens-Romero, T. M. Brown, M. Carreras-Sospedra, J. E. Kang, J. Brouwer, D. Dabdub, W. W. Recker und G. S. Samuelsen. *Projecting full build-out environmental impacts and roll-out strategies associated with viable hydrogen fueling infrastructure strategies*. International Journal of Hydrogen Energy 36.22 (2011), S. 14309–14323.
- [40] E. Kontogeorgopoulou. *Simulation, Optimierung und Bewertung der Speichertopologie für einen Wasserstoffbetankungsvorgang*. Masterarbeit. Technische Universität Berlin. Betreuer: Frank Behrendt, André Pasemann und Fabian Grüger, 2017.

## I. Literaturverzeichnis

- [41] E. Talpacci, M. Reu, T. Grube, P. Cilibrizzi, R. Gunnella, M. Robinius und D. Stolten. *Effect of cascade storage system topology on the cooling energy consumption in fueling stations for hydrogen vehicles*. International Journal of Hydrogen Energy 43.12 (2018), S. 6256–6265.
- [42] *SAE J2601-1, Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles*. SAE International.
- [43] *SAE J2601-2, Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles*. SAE International.
- [44] B. Reuter, M. Faltenbacher, O. Schuller, W. Nicole und S. Whitehouse. *New Bus Refuelling for European Hydrogen Bus Depots, Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling*. Fuel Cells und Hydrogen Joint Undertaking, 2017.
- [45] Mineralölwirtschaftsverband e.V. *Website*. <https://www.mwv.de/statistiken/tankstellenbestand/>. März 2018.
- [46] Zukunft ERDGAS GmbH. *Website*. <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/fakten-erdgas-als-kraftstoff/erdgas-einfach-tanken/>. März 2018.
- [47] Tankerkönig.de auf Basis der Daten der Markttransparenzstelle für Kraftstoffe. *Historische Preisdaten für das Jahr 2016*. <https://creativecommons.tankerkoenig.de/>. Juni 2017.
- [48] M. Melaina und J. Bremson. *Refueling availability for alternative fuel vehicle markets: sufficient urban station coverage*. Energy Policy 36.8 (2008), S. 3233–3241.
- [49] P. Seydel. *Entwicklung und Bewertung einer langfristigen regionalen Strategie zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur - auf Basis der Modellverknüpfung eines Geografischen Informationssystems und eines Energiesystemmodells*. Diss. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2008.
- [50] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. *GermanHy: Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?* 2009.
- [51] D. Krieg. *Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Strassenverkehrs mit Wasserstoff*. Diss. RWTH Aachen University, 2012.
- [52] M. Robinius. *Strom- und Gasmarktdesign zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff*. Diss. RWTH Aachen University, 2015.
- [53] J. Hartmann. *Anforderungen an die räumliche Verfügbarkeit von Wasserstofftankstellen und Ladesäulen im Kontext des heutigen Tankstellennetzes*. Masterarbeit. Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin. Betreuer: Volker Quaschnig und Fabian Grüger, 2017.

- [54] M. W. Melaina. *Initiating hydrogen infrastructures: preliminary analysis of a sufficient number of initial hydrogen stations in the US*. International Journal of Hydrogen Energy 28.7 (2003), S. 743–755.
- [55] M. Nicholas und N. Johnson. *Rural needs for hydrogen station coverage*. In: NHA Annual Hydrogen Conference. 2005.
- [56] D. Keles, M. Wietschel, D. Möst und O. Rentz. *Market penetration of fuel cell vehicles—analysis based on agent behaviour*. International Journal of Hydrogen Energy 33.16 (2008), S. 4444–4455.
- [57] F. J. Huétink, A. van der Vooren und F. Alkemade. *Initial infrastructure development strategies for the transition to sustainable mobility*. Technological Forecasting and Social Change 77.8 (2010), S. 1270–1281.
- [58] M. Miyagawa. *Density of alternative fuel stations and refueling availability*. International Journal of Hydrogen Energy 38.28 (2013), S. 12438–12445.
- [59] International Energy Agency. *Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells*. 2015.
- [60] J. Ogden und M. Nicholas. *Analysis of a cluster strategy for introducing hydrogen vehicles in Southern California*. Energy Policy 39.4 (2011), S. 1923–1938.
- [61] J. Brey, A. Carazo und R. Brey. *Analysis of a hydrogen station roll-out strategy to introduce hydrogen vehicles in Andalusia*. International Journal of Hydrogen Energy 39.8 (2014), S. 4123–4130.
- [62] M. Melendez und A. Milbrandt. *Analysis of the hydrogen infrastructure needed to enable commercial introduction of hydrogen-fueled vehicles*. In: National Hydrogen Association Annual Conference, Washington, DC. 2005.
- [63] P. Melo, J. Ribau und C. Silva. *Urban bus fleet conversion to hybrid fuel cell optimal powertrains*. Procedia - Social and Behavioral Sciences 111 (2014), S. 692–701.
- [64] B. C. Langford und C. Cherry. *Transitioning a bus transit fleet to hydrogen fuel: A case study of Knoxville Area Transit*. International Journal of Hydrogen Energy 37.3 (2012), S. 2635–2643.
- [65] D. Joffe, D. Hart und A. Bauen. *Modelling of hydrogen infrastructure for vehicle refuelling in London*. Journal of Power Sources 131.1 (2004), S. 13–22.
- [66] F. Zhang, N. J. Yuan, D. Wilkie, Y. Zheng und X. Xie. *Sensing the pulse of urban refueling behavior: A perspective from taxi mobility*. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST) 6.3 (2015), S. 37.
- [67] Linne+Krause Marketing-Forschung. *Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit des Taxigewerbes in der Bundeshauptstadt Berlin*. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, 2016.

## I. Literaturverzeichnis

- [68] A. Kriston, T. Szabó und G. Inzelt. *The marriage of car sharing and hydrogen economy: A possible solution to the main problems of urban living*. International Journal of Hydrogen Energy 35.23 (2010), S. 12697–12708.
- [69] S. Schmöller, S. Weikl, J. Müller und K. Bogenberger. *Empirical analysis of free-floating carsharing usage: The Munich and Berlin case*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 56 (2015), S. 34–51.
- [70] M. M. Lopes, L. M. Martinez und G. H. de Almeida Correia. *Simulating carsharing operations through agent-based modelling: An application to the city of Lisbon, Portugal*. Transportation Research Procedia 3 (2014), S. 828–837.
- [71] civity Mangement Consultants. *Daten zur zeitlichen Verteilung von Tankvorgängen von Carsharing-Fahrzeugen in Deutschland für 6 Monate sowie zur Flottengröße*. Persönliche Mitteilung. 2017.
- [72] civity Mangement Consultants. *Daten zu Tankfüllständen von Carsharing-Fahrzeugen in Deutschland für 11 Monate*. Persönliche Mitteilung. 2017.
- [73] S. Nistor, S. Dave, Z. Fan und M. Sooriyabandara. *Technical and economic analysis of hydrogen refuelling*. Applied Energy 167 (2016), S. 211–220.
- [74] L. Zhao und J. Brouwer. *Dynamic operation and feasibility study of a self-sustainable hydrogen fueling station using renewable energy sources*. International Journal of Hydrogen Energy 40 (2015), S. 3822–3837.
- [75] B. Li, R. Roche und A. Miraoui. *Microgrid sizing with combined evolutionary algorithm and MILP unit commitment*. Applied Energy 188 (2017), S. 547–562.
- [76] S. Carr, F. Zhang, F. Liu, Z. Du und J. Maddy. *Optimal operation of a hydrogen refuelling station combined with wind power in the electricity market*. International Journal of Hydrogen Energy 41.46 (2016), S. 21057–21066.
- [77] J. G. García Clúa, R. J. Mantz und H. De Battista. *Evaluation of hydrogen production capabilities of a grid-assisted wind-H<sub>2</sub> system*. Applied Energy 88 (2011), S. 1857–1863.
- [78] M. Kopp, D. Coleman, C. Stiller, K. Scheffer, J. Aichinger und B. Scheppat. *Energiepark Mainz: Technical and economic analysis of the worldwide largest Power-to-Gas plant with PEM electrolysis*. International Journal of Hydrogen Energy 42 (2017), S. 13311–13320.
- [79] B. Guinot, F. Montignac, B. Champel und D. Vannucci. *Profitability of an electrolysis based hydrogen production plant providing grid balancing services*. International Journal of Hydrogen Energy 40.29 (2015), S. 8778–8787.
- [80] F. Grüger, F. Möhrke, M. Robinius und D. Stolten. *Early power to gas applications: Reducing wind farm forecast errors and providing secondary control reserve*. Applied Energy 192 (2017), S. 551–562.

- [81] F. Gröger, O. Hoch, J. Hartmann, M. Robinius und D. Stolten. *Optimized Electrolyzer Operation: Employing Forecasts of Wind Energy Availability, Hydrogen Demand, and Electricity Prices*. International Journal of Hydrogen Energy (Zur Veröffentlichung angenommen) (2018).
- [82] R. Kitamura und D. Sperling. *Refueling behavior of automobile drivers*. Transportation Research Part A: General 21.3 (1987), S. 235–245.
- [83] M. J. Kuby, S. B. Kelley und J. Schoenemann. *Spatial refueling patterns of alternative-fuel and gasoline vehicle drivers in Los Angeles*. Transportation Research Part D: Transport and Environment 25 (2013), S. 84–92.
- [84] S. Kelley und M. Kuby. *On the way or around the corner? Observed refueling choices of alternative-fuel drivers in Southern California*. Journal of Transport Geography 33 (2013), S. 258–267.
- [85] I. Bunzeck, J. Backhaus und B. Hoevenaars. *Building a hydrogen refuelling infrastructure in the Netherlands: influencing factors from the car drivers' perspective*. 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 (2010).
- [86] J. J. Brey, R. Brey, A. F. Carazo, M. Ruiz-Montero und M. Tejada. *Incorporating refuelling behaviour and drivers' preferences in the design of alternative fuels infrastructure in a city*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 65 (2016), S. 144–155.
- [87] M. A. Nicholas. *Driving demand: What can gasoline refueling patterns tell us about planning an alternative fuel network?*. Journal of Transport Geography 18.6 (2010), S. 738–749.
- [88] C. S. ReVelle und R. W. Swain. *Central facilities location*. Geographical analysis 2.1 (1970), S. 30–42.
- [89] M. Nicholas, S. Handy und D. Sperling. *Using geographic information systems to evaluate siting and networks of hydrogen stations*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1880 (2004), S. 126–134.
- [90] M. Nicholas und J. Ogden. *Detailed analysis of urban station siting for California hydrogen highway network*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1983 (2006), S. 121–128.
- [91] Z. Lin, J. Ogden, Y. Fan und C.-W. Chen. *The fuel-travel-back approach to hydrogen station siting*. International Journal of Hydrogen Energy 33.12 (2008), S. 3096–3101.
- [92] R. Church und C. ReVelle. *The maximal covering location problem*. In: Papers of the Regional Science Association. Bd. 32. 1. Springer. 1974, S. 101–118.
- [93] S. D. Stephens-Romero, T. M. Brown, J. E. Kang, W. W. Recker und G. S. Samuelsen. *Systematic planning to optimize investments in hydrogen infrastructure deployment*. International Journal of Hydrogen Energy 35.10 (2010), S. 4652–4667.

## I. Literaturverzeichnis

- [94] M. J. Hodgson. *A Flow-Capturing Location-Allocation Model*. Geographical Analysis 22.3 (1990), S. 270–279.
- [95] M. J. Hodgson und K. E. Rosing. *A network location-allocation model trading off flow capturing and p-median objectives*. Annals of Operations Research 40.1 (1992), S. 247–260.
- [96] M. Kuby, L. Lines, R. Schultz, Z. Xie, J.-G. Kim und S. Lim. *Optimization of hydrogen stations in Florida using the flow-refueling location model*. International Journal of Hydrogen Energy 34.15 (2009), S. 6045–6064.
- [97] M. Kuby und S. Lim. *The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles*. Socio-Economic Planning Sciences 39.2 (2005), S. 125–145.
- [98] M. Kuby und S. Lim. *Location of alternative-fuel stations using the flow-refueling location model and dispersion of candidate sites on arcs*. Networks and Spatial Economics 7.2 (2007), S. 129–152.
- [99] C. Upchurch, M. Kuby und S. Lim. *A Model for Location of Capacitated Alternative-Fuel Stations*. Geographical Analysis 41.1 (2009), S. 85–106.
- [100] S. Hong und M. Kuby. *A threshold covering flow-based location model to build a critical mass of alternative-fuel stations*. Journal of Transport Geography 56 (2016), S. 128–137.
- [101] S. Lim und M. Kuby. *Heuristic algorithms for siting alternative-fuel stations using the flow-refueling location model*. European Journal of Operational Research 204.1 (2010), S. 51–61.
- [102] W. Zeng, I. Castillo und J. Hodgson. *A Generalized Model for Locating Facilities on a Network with Flow-Based Demand*. Networks and Spatial Economics 10 (2010), S. 579–611.
- [103] I. Capar und M. Kuby. *An efficient formulation of the flow refueling location model for alternative-fuel stations*. IIE Transactions 44.8 (2012), S. 622–636.
- [104] J. E. Kang und W. Recker. *Strategic hydrogen refueling station locations with scheduling and routing considerations of individual vehicles*. Transportation Science 49.4 (2014), S. 767–783.
- [105] M. Frick, K. Axhausen, G. Carle und A. Wokaun. *Optimization of the distribution of compressed natural gas (CNG) refueling stations: Swiss case studies*. Transportation Research Part D: Transport and Environment 12 (2007), S. 10–22.
- [106] M. Schwoon. *Managing the transition to hydrogen and fuel cells vehicles: insights from agent-based and evolutionary models*. Diss. Max Planck Institute for Meteorology, 2006.
- [107] Reiner Lemoine Institut gGmbH. *H2BER : Entwicklung, Erprobung und Bewertung intelligenter Betriebsstrategien für die verschiedenen Komponenten und die Gesamtsteuerung der Wasserstoff-Tankstelle am Flughafen Berlin Brandenburg (BER): Abschlussbericht*. 2017.

- [108] F. Gröger, F. Möhrke, J. Hartmann und F. Schaller. *An Approach for the Simulation and Control of Microgrids under Consideration of Various Energy Forms and Mass Flows*. In: 9th International Renewable Energy Storage Conference (IRES 2015). 2015.
- [109] The MathWorks Inc. *MATLAB Release 2014b*.
- [110] A. Wanitschke. *Multi-Objective Optimization of Micro Grids using Evolutionary Algorithms*. Masterarbeit. Technische Universität Berlin. Betreuer: Frank Behrendt, Gregor Drenkelfort und Fabian Gröger, 2014.
- [111] Overspeed GmbH. *Mess- und Prognosedaten zu Windenergieproduktion*. Persönliche Mitteilung.
- [112] European Energy Exchange. *Börsenordnung der EEX*. 2018.
- [113] EPEX Spot SE. *Website*. <https://www.epexspot.com/>. Dez. 2016.
- [114] A. Elgowainy und K. Reddi. *Hydrogen fueling station pre-cooling analysis*. Department of Energy, Hydrogen und Fuel Cells Program, 2015.
- [115] Kraftfahrt-Bundesamt. *Fahrzeugzulassungen (FZ): Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen 2017*. 2017.
- [116] H2 Mobility GmbH & Co. KG. *70 MPa Hydrogen Refuelling Station Standardization — Functional Description of Station Modules*. 2010.
- [117] F. Olmos und V. I. Manousiouthakis. *Hydrogen car fill-up process modeling and simulation*. International Journal of Hydrogen Energy 38.8 (2013), S. 3401–3418.
- [118] Vertraulich. *Tankdaten zweier Tankstellen für jeweils zwei Wochen*. 2015.
- [119] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. *Amtliche Mineralöl-daten 2013 – 2015*. 2016.
- [120] Greater London Authority. *Mayor’s transport strategy: public draft: June 2017*. 2017.
- [121] M. Müller und O. Scholz. *Letter of Intent zwischen dem Land Berlin und der Freien und Hansestadt Hamburg. Gemeinsame Beschaffungsinitiative für emissionsfreie Linienbusse im ÖPNV*. 2016.
- [122] Regionalverkehr Köln GmbH. *Pressemitteilung*. <http://www.rvk.de/presse/aktuelle-pressemeldungen/detailansicht/article/rvk-bestellt-groesste-flotte-an-brennstoffzellen-hybridbussen.html>. Juni 2018.
- [123] Kraftfahrt-Bundesamt. *Bestand an Kraftomnibussen mit der Antriebsart Brennstoffzelle am 01. Januar 2017*. 2017.
- [124] M. Kentzler. *HyFLEET:CUTE — Hydrogen Transports*. 2009.
- [125] Clean Energy Partnership. *CEP — Abschlussdokumentation*. 2016.
- [126] J. Märten. *Analyse der Reisegeschwindigkeiten von Verkehrssystemen im urbanen Raum*. Masterarbeit. Technische Universität Berlin, 2017.

## I. Literaturverzeichnis

- [127] Ballard Power Systems. *Economic Case for Hydrogen Buses in Europe*. 2017.
- [128] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. *Fuel Cell Electric Buses - Potential for Sustainable Public Transport in Europe*. 2015.
- [129] M. Faltenbacher. *Marktsituation und innovative Busprojekte in Deutschland — Auswertung und Erkenntnisse aus der Praxis*. In: Elektromobilität vor Ort — 3. Fachkonferenz des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. 2016.
- [130] M. Schmied und M. Mottschall. *Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2010.
- [131] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. *BDEW-Strompreisanalyse Mai 2017*. 2017.
- [132] ADAC e.V. *Monatliche Durchschnittspreise Kraftstoffe*. <https://www.adac.de/infotestrat/tanken-kraftstoffe-und-antrieb/kraftstoffpreise/kraftstoff-durchschnittspreise/default.aspx>. Juni 2017.
- [133] Linne + Krause Marketing-Forschung GbR. *Taxi-Tourenverteilung der Stadt Hamburg im Jahr 2013*. Linne + Krause Marketing-Forschung GbR. 2013.
- [134] taxi-heute.de. *Website*. <https://www.taxi-heute.de/Das-bundesweite-Taxi-Magazin/5379/Artikel/Beispiellos-verbrauchsarm-Taxiunternehmer-entdecken-den-Hybridantrieb>. Aug. 2009.
- [135] taxi-heute.de. *Website*. <https://www.taxi-heute.de/Taxi-News/News/12858/Berliner-Alleinunternehmer-mietet-ein-Tesla-Taxi>. Dez. 2016.
- [136] autoflotte.de. *Website*. <https://www.autoflotte.de/nachrichten/artikel/brennstoffzellenauto-toyota-nennt-leasingrate-fuer-mirai-1624412.html>. Juni 2017.
- [137] Sixt. *Website*. <https://www.sixt-neuwagen.de/tesla>. Jan. 2018.
- [138] Sixt. *Website*. <https://www.sixt-neuwagen.de/>. Dez. 2017.
- [139] Bundesverband CarSharing e.V. *Datenblatt Carsharing in Deutschland*. 2017.
- [140] Mobility Center GmbH. *Website*. <https://www.teilauto.net>. Juni 2017.
- [141] Linde Hydrogen Concepts GmbH. <https://beezero.com/de>. Juni 2017.
- [142] F. Grüger, L. Dylewski, M. Robinius und D. Stolten. *Carsharing with fuel cell vehicles: Sizing hydrogen refueling stations based on refueling behavior*. Applied Energy (2018), S. 1540–1549.
- [143] Daimler AG. *Technische Daten smart fortwo*. <https://www.smart.com/de/de/index/smart-fortwo-453/technical-data.html>. Juli 2017.
- [144] BMW AG. *Technische Daten BMW 1er*. <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/1er/5-tuerer/2017/technische-daten.html>. Juli 2017.

- [145] BMW AG. *Technische Daten Mini Cooper 3-Türer*. [https://www.mini.de/de\\_DE/home/range/mini-3-tuerer/mini-cooper-3-tuerer.html](https://www.mini.de/de_DE/home/range/mini-3-tuerer/mini-cooper-3-tuerer.html). Juli 2017.
- [146] Spritmonitor.de. <https://spritmonitor.de>. Juli 2017.
- [147] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. *Richtlinie zur Förderung des Absatzes von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Umweltbonus)*. 2018.
- [148] L. Eudy und M. Post. *BC Transit Fuel Cell Bus Project: Evaluation Results Report*. National Renewable Energy Laboratory, 2014.
- [149] M. Robinius, T. Raje, S. Nykamp, T. Rott, M. Müller, T. Grube, B. Katzenbach, S. Küppers und D. Stolten. *Power-to-Gas: Electrolyzers as an alternative to network expansion – An example from a distribution system operator*. *Applied Energy* 210 (2018), S. 182–197.
- [150] Fraunhofer IEE. *Windenergie Report Deutschland 2017*. 2018.
- [151] S. Lüers, A.-K. Wallasch und K. Rehfeldt. *Kostensituation der Windenergie an Land in Deutschland — Update*. Deutsche Windguard, 2015.
- [152] M. Jentsch. *Potenziale von Power-to-Gas Energiespeichern*. Diss. Universität Kassel, 2014.
- [153] J. Burkhardt, A. Patyk, P. Tanguy und C. Retzke. *Hydrogen mobility from wind energy — A life cycle assessment focusing on the fuel supply*. *Applied Energy* 181 (2016), S. 54–64.
- [154] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. *Verwaltungsgebiete 1:250000, 2010*. [https://upd.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz\\_rahmen.gdz\\_div](https://upd.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz_rahmen.gdz_div). Aug. 2017.
- [155] Statistische Ämter des Bundes und der Länder. *Zensus 2011*. <https://www.zensus2011.de/SharedDocs/Aktuelles/Ergebnisse/DemografischeGrunddaten.html>. 2015.
- [156] Geofabrik GmbH. *Website*. <http://download.geofabrik.de/>. Feb. 2017.
- [157] OpenStreetMap. *Website*. [openstreetmap.org](http://openstreetmap.org). Feb. 2017.
- [158] Statistische Ämter des Bundes und der Länder. *Daten aus dem Gemeindeverzeichnis Städte in Deutschland nach Fläche und Bevölkerung auf Grundlage des ZENSUS 2011 und Bevölkerungsdichte*. 2016.
- [159] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. *Bericht über die Sondererhebung zum Taxen- und Mietwagenverkehr*. 2012.
- [160] Berliner Verkehrsbetriebe. *Geschäftsbericht 2016*. 2016.
- [161] car2go Deutschland GmbH. *Pressemitteilung vom 15.08.2017*. 2017.
- [162] DriveNow GmbH & Co. KG. *Website*. <https://www.drive-now.com/de/de/berlin>. Juni 2017.

## I. Literaturverzeichnis

- [163] Chemnitzer Verkehrs-AG. *Website*. [http://www.cvag.de/de/Unternehmen/CVAG\\_in\\_Zahlen\\_2298.html](http://www.cvag.de/de/Unternehmen/CVAG_in_Zahlen_2298.html). Stand Ende 2015. Juni 2017.
- [164] bettertaxi.de. *Website*. <https://www.bettertaxi.de/t>. Juni 2017.
- [165] Cottbusverkehr GmbH. *Website*. <http://www.cottbusverkehr.de/unternehmen/>. Stand 31.12.2016. Juni 2017.
- [166] Dresdner Verkehrsbetriebe AG. *Website*. <https://www.dvb.de/de-de/die-dvb/technik/fahrzeuge/>. Juni 2017.
- [167] Deutscher Taxi- und Mietwagenverband e.V. *BZP Geschäftsbericht 2015, 2016*. 2016.
- [168] Erfurter Verkehrsbetriebe AG. *Website*. [https://www.stadtwerke-erfurt.de/pb/swe/produkte+\\_leistungen/stadtbahn+\\_bus/die+evag](https://www.stadtwerke-erfurt.de/pb/swe/produkte+_leistungen/stadtbahn+_bus/die+evag). Juni 2017.
- [169] Hallesche Verkehrs-AG. *Website*. <https://www.havag.com/unternehmen/havag/zahlen-und-fakten>. Stand Ende 2016. Juni 2017.
- [170] Jenaer Nahverkehr GmbH. *Web*. <https://www.nahverkehr-jena.de/de/unternehmen/portraet.html>. Juni 2017.
- [171] Taxigenossenschaft Jena. *Website*. <http://www.jenaer-taxi.de/fahrzeugflotte.htm>. Juni 2017.
- [172] LeoBus GmbH. *Website*. <http://www.leobus.de/unternehmen>. Juni 2017.
- [173] Magdeburger Verkehrsbetriebe GmbH & Co. KG. *Web*. <http://www.mvbnet.de/unternehmen/zahlen-fakten/fahrzeugflotte/>. Stand 01.01.2016. Juni 2017.
- [174] Taxi & Mietwagengenossenschaft Magdeburg e.G. *Information per E-Mail*. Juni 2017.
- [175] Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH. *ÖPNV-Konzept 2025*. 2016.
- [176] Taxi-Zentrale Potsdam Am Sterncenter Taxi-Genossenschaft Potsdam e.G. *Website*. <http://www.taxi-potsdam.de>. Juni 2017.
- [177] Rostocker Straßenbahn AG. *Website*. [http://www.rsag-online.de/unternehmen/ueber\\_uns/zahlen\\_und\\_fakten](http://www.rsag-online.de/unternehmen/ueber_uns/zahlen_und_fakten). Stand 01.01.2017. Juni 2017.
- [178] Stadtwerke Schwerin GmbH. *Geschäftsbericht 2015*. 2015.
- [179] Schweriner Taxigenossenschaft e.V. *Website*. <http://www.schweriner-taxigenossenschaft.de/>. Juni 2017.
- [180] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH und TransnetBW GmbH. *Netzentwicklungsplan Strom 2030, Version 2017, 2. Entwurf*. 2017.
- [181] K. Stolzenburg, R. Hamelmann, M. Wietschel, F. Genoese, J. Michaelis, J. Lehmann, A. Miede, S. Krause, C. Sponholz, S. Donadei u. a. *Integration von Wind-Wasserstoff-Systemen in das Energiesystem*. NOW-Studie, Berlin (2014).

- [182] U. Albrecht, M. Altmann, J. Michalski, T. Raksha und W. Weindorf. *Analyse der Kosten Erneuerbarer Gase*. Eine Expertise für den Bundesverband Windenergie und den Fachverband Biogas. Ottobrun: Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) (2013).
- [183] L. Bertuccioli, A. Chan, D. Hart, F. Lehner, B. Madden und E. Standen. *Study on development of water electrolysis in the EU*. Final report in fuel cells and hydrogen joint undertaking (2014).
- [184] B. V. Mathiesen, I. Ridjan, D. Connolly, M. P. Nielsen, P. Vang Hendriksen, M. Bjerg Mogensen, S. Højgaard Jensen und S. Dalgaard Ebbesen. *Technology data for high temperature solid oxide electrolyser cells, alkali and PEM electrolysers*. Department of Development und Planning, Aalborg University, 2013.
- [185] L. Grond, P. Schulze und J. Holstein. *Systems analyses power to gas: a technology review*. DNV KEMA Energy & Sustainability, Groningen (2013).
- [186] T. Smolinka, M. Günther und J. Garche. *Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien*. Kurzfassung des Abschlussberichtes NOW-Studie, Freiburg im Breisgau (2011).
- [187] C. Noack, F. Burggraf, S. S. Hosseiny, P. Lettenmeier, S. Kolb, S. Belz, J. Kallo, K. A. Friedrich, T. Pregger, K.-K. Cao u. a. *Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck*. (2014).
- [188] Statistisches Bundesamt. *Verbraucherpreisindizes für Deutschland*. Statistisches Bundesamt (Destatis). Apr. 2017.
- [189] C. J. Greiner, M. Korpås und A. T. Holen. *A Norwegian case study on the production of hydrogen from wind power*. International Journal of Hydrogen Energy 32.10 (2007), S. 1500–1507.
- [190] P. Hill und M. Penev. *Hydrogen Fueling Station in Honolulu, Hawaii Feasibility Analysis*. (2014).
- [191] United States Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy sustainability. *Hydrogen Delivery — Technical Team Roadmap*. 2013.
- [192] A. Elgowainy, K. Reddi und D. Brown. *Analysis of Incremental Fuel Pressure Cost*. 2014 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Annual Merit Review. Juni 2014.
- [193] Europäische Zentralbank. *Euro-Referenzkurs der EZB*. 2017.
- [194] J. Pratt, D. Terlip, C. Ainscough, J. Kurtz und A. Elgowainy. *H2FIRST Reference Station Design Task (Technical No. NREL/TP-5400-64107)*. National Renewable Energy Laboratory, Washington, DC (2015).

## I. Literaturverzeichnis

- [195] G. Parks, R. Boyd, J. Cornish und R. Remick. *Hydrogen Station Compression, Storage, and Dispensing Technical Status and Costs: Systems Integration*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., 2014.
- [196] U. Bünger, H. Landinger, E. Pschorr-Schoberer, P. Schmidt, W. Weindorf, J. Jöhrens, U. Lambrecht, K. Naumann und A. Lischke. *Power-to-Gas (PtG) im Verkehr — Aktueller Stand und Entwicklungsperspektiven*. Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt (DLR), Institut für Energie und Umweltforschung GmbH (ifeu), Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ), München, Heidelberg, Leipzig, Berlin (2014).
- [197] P. I. Dahl, U. Bünger, S. Völler, M. Korpås und S. Møller-Holst. *Hydrogen for transport from renewable energy in Mid-Norway*. (2013).
- [198] J. McKinney, E. Bond, M. Crowell und E. Odufuwa. *Joint Agency Staff Report on Assembly Bill 8: Assessment of Time and Cost Needed to Attain 100 Hydrogen Refueling Stations in California*. California Energy Commission und California Air Resources Board, 2015.
- [199] W. Tong. *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. Hrsg. von W. Tong. WIT Press, 2010.

## DANKSAGUNG

Mein besonderer und herzlicher Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten für die Betreuung meines Promotionsvorhabens und wertvolle inhaltliche Impulse. Ich bin dankbar, in den Kreis der Promovierenden am Institut für Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3) des Forschungszentrums Jülich eingebunden worden zu sein. Herrn Jun.-Prof. Dr.-Ing. Aaron Praktijn möchte ich für die Übernahme des Koreferats und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. pol. habil. Michael Lauster für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danken.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Reiner Lemoine Institut (RLI) in Berlin. Trotz der großen räumlichen Distanz zum IEK-3 wurde ich insbesondere von Herrn Dr.-Ing. Martin Robinius und Herrn Dr.-Ing. Thomas Grube jederzeit inhaltlich beraten und operativ betreut. Für diese wertvolle Unterstützung und die Durchsicht meiner Arbeit möchte ich mich ganz herzlich bedanken. Der Austausch mit anderen Doktoranden am IEK-3 war bereichernd und ich möchte insbesondere Lara Welder, Leander Kotzur und Markus Reuß dafür danken. Auf Seiten der Verwaltung danke ich Frau Anne Schröders und Frau Anke Clemens für die stets hilfsbereite und prompte Behandlung meiner Anliegen.

Dem RLI möchte ich dafür danken, dass ich mein Promotionsvorhaben teils im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter durchführen konnte. Durch das sehr kollegiale Umfeld war diese Zeit eine große Bereicherung. Insbesondere möchte ich Jörn Hartmann für seine herausragende Abschlussarbeit sowie die teils aufopferungsvolle Unterstützung bei der Bewältigung programmiertechnischer Probleme danken. Auch Alexander Wanitschke gilt mein Dank. Der in dieser Arbeit verwendete Optimierungsalgorithmus entstand im Rahmen seiner Abschlussarbeit. Stephen Bosch möchte ich für Hilfestellungen im Umgang mit  $\LaTeX$  und der englischen Sprache danken. Marius Holst, Elena Kontogeorgopoulou und Tim Röpcke danke ich für ihre Arbeit als studentische Mitarbeiter. Bei meinen Bürokollegen Jörn Hartmann, Marlon Fleck und Oliver Hoch bedanke ich mich für die wirklich tolle gemeinsame Zeit.

Darüber hinaus bin ich dankbar für Unterstützung der Kooperationspartner aus der Industrie. Bei der Vorbereitung und Erstellung dieser Arbeit wurde teils kostenlose und quelloffene Software verwendet. Ich möchte den Urhebern für ihre beeindruckende Arbeit herzlich danken.

Andreas Lange gilt mein herzlicher Dank für seine Unterstützung und wertvollen Rat. Meinen Eltern danke ich für die langjährige Unterstützung, nicht nur während meiner Zeit als Doktorand. Ganz besonderer Dank gebührt meiner Frau Hanna. Ohne ihre Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Sie bewahrte mich vor so manchem sprachlichen Fallstrick, besonders wertvoll waren jedoch ihre strategische und inhaltliche Beratung sowie die moralische Unterstützung. Vielen Dank!



Band / Volume 453

**Neue Optionen für einen wirtschaftlichen Betrieb von Wasserstoffzügen durch Nutzung der LOHC-Technologie?**

P. Wasserscheid, T. Grube, D. Sternfeld, M. Essl, M. Robinius, D. Stolten  
(2019), II, 88 pp  
ISBN: 978-3-95806-386-0

Band / Volume 454

**Reformierung von BtL-Kraftstoffen für die HT-PEFC in luftfahrttechnischen Systemen**

C. Wilbrand (2019), IV, 312 pp  
ISBN: 978-3-95806-387-7

Band / Volume 455

**Entwicklung von thermischen Spritzprozessen für fortschrittliche Schutz- und Funktionsschichten**

G. Mauer (2019), vi, 57 pp  
ISBN: 978-3-95806-388-4

Band / Volume 456

**Columnar Structured Thermal Barrier Coatings Deposited by Axial Suspension Plasma Spraying**

D. Zhou (2019), VI, 126 pp  
ISBN: 978-3-95806-391-4

Band / Volume 457

**Modellierung zeitlich aufgelöster Ladeenergienachfragen von batterie-elektrischen Fahrzeugen und deren Abbildung in einem Energiesystemmodell**

J. F. Linßen (2019), VIII, 189 pp  
ISBN: 978-3-95806-395-2

Band / Volume 458

**Synthesis and Analysis of Spinel Cathode Materials for High Voltage Solid-State Lithium Batteries**

A. Windmüller (2019), iv, 142 pp  
ISBN: 978-3-95806-396-9

Band / Volume 459

**Monazite-type ceramics as nuclear waste form: Crystal structure, microstructure and properties**

Y. Arinicheva (2019), 194 pp  
ISBN: 978-3-95806-397-6

Band / Volume 460

**Coupling a Solid Oxide Fuel Cell with a Biomass Gasifier:  
Degradation Mechanisms and Alternative Anode Materials**

H. Jeong (2019), II, 112 pp

ISBN: 978-3-95806-398-3

Band / Volume 461

**Model-based Source Partitioning of Eddy Covariance Flux Measurements**

A. Klosterhalfen (2019), XVI, 132 pp

ISBN: 978-3-95806-401-0

Band / Volume 462

**Entwicklung von großflächigen PECVD-Prozessen zur kontrollierten,  
homogenen Abscheidung dünner Siliziumschichten für die Photovoltaik**

B. O. Grootenk (2019), 154 pp

ISBN: 978-3-95806-402-7

Band / Volume 463

**Simulation of Transport Processes through an Asymmetric Gas  
Separation Membrane**

U. V. Unije (2019), xiv, 101 pp

ISBN: 978-3-95806-403-4

Band / Volume 464

**Development, calibration and deployment of an airborne chemical  
ionization mass spectrometer for trace gas measurements**

T. Khattatov (2019), 14, 125 pp

ISBN: 978-3-95806-404-1

Band / Volume 465

**IEK-3 Report 2019 – Maßgeschneiderte Energieumwandlung für  
nachhaltige Kraftstoffe**

D. Stolten, B. Emonts (Eds.) (2019), 171 pp

ISBN: 978-3-95806-410-2

Band / Volume 466

**Initialinfrastruktur für Wasserstoffmobilität auf Basis von Flotten**

F. Grüger (2019), V, 209 pp

ISBN: 978-3-95806-413-3

Weitere **Schriften des Verlags im Forschungszentrum Jülich** unter  
<http://www.zb1.fz-juelich.de/verlagextern1/index.asp>



Energie & Umwelt / Energy & Environment  
Band / Volume 466  
ISBN 978-3-95806-413-3