

**Abschlussbericht des Förderprojekts
“Linde Hydrogen Mobility Concept –
Analyse, Bewertung und Modellbildung eines
neuartigen Mobilitätskonzepts auf Basis von
Brennstoffzellenfahrzeugen”**

Förderkennzeichen: 03B10401

München, Juli 2019

INHALT

<u>I. KURZE DARSTELLUNG ZU AUFGABENSTELLUNG, VORAUSSETZUNGEN, PLANUNG UND ABLAUF, UND WISSENSCHAFTLICHEM UND TECHNISCHEM STAND</u>	<u>4</u>
1. AUFGABENSTELLUNG	4
2. VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE.....	5
3. PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS	6
4. WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND.....	8
5. ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	8
<u>II. EINGEHENDE DARSTELLUNG</u>	<u>9</u>
1. DER VERWENDUNG DER ZUWENDUNG UND DES ERZIELTEN ERGEBNISSES IM EINZELNEN, MIT GEGENÜBERSTELLUNG DER VORGEgebenEN ZIELE.....	9
AP1: FORSCHUNGSVORHABEN FCEV	9
1) AP 1.1: Analyse der Fahrzeugeigenschaften im Realbetrieb	9
2) AP 1.2: Modellbildung und Simulation FCEV (TUM)	25
3) AP 1.3: Technologievergleich FCEV/BEV/ICEV (TUM)	38
4) AP 1.4: Optimierung der Fahrzeugeigenschaften für den Flotteneinsatz (TUM)	39
AP2: FORSCHUNGSVORHABEN H ₂ -INFRASTRUKTUR.....	40
1) AP 2.1: Erforschung Tankstellenlage / HRS-Standort.....	40
2) AP 2.2: Erforschung Nutzungsdaten HRS – Tankstellenkomponenten	43
3) AP 2.3: Erforschung Nutzungsdaten HRS – Wasserstoffabgabe	45
4) AP 2.4: Erforschung Nutzungsdaten HRS – Zuverlässigkeit	46
5) AP 2.5: Auslegung eines optimalen Tankstellennetzwerks für den Großraum München (TUM)..	48
6) AP 2.6: Überregionale Infrastrukturplanung für den flächendeckenden Einsatz von FCEV (TUM)	53
7) AP 2.7: Erforschung Net-Promoter-Score zur Tankstellenakzeptanz	57
AP 3: FORSCHUNGSVORHABEN ENDNUTZER.....	58
1) AP 3.1: Analyse des globalen Mobilitätsverhaltens (Linde/TUM)	58
2) AP 3.2: Analyse räumlich/zeitlicher Einflussfaktoren auf das Mobilitätsverhalten (TUM).....	73
3) AP 3.3: Modellierung des Gesamtsystems in einer agenten-basierten Simulationsumgebung (TUM).....	73
4) AP 3.4: Optimierung des Carsharing-Konzepts (TUM)	79
5) AP 3.5: Benchmark Car-Sharing-Konzepte	88
6) AP 3.6: Erforschung Nutzerprofile	89
7) AP 3.7: Erforschung Fahrtmuster	102
8) AP 3.8: Erforschung Optimierung Nutzerprofile/Fahrtmuster	114
ZUSAMMENFASSUNG.....	115
1) Forschungsvorhaben FCEV	115
2) Forschungsvorhaben H ₂ -Infrastruktur	115
3) Forschungsvorhaben Endnutzer	116
<u>III. LITERATURVERZEICHNIS.....</u>	<u>119</u>
<u>BERICHTSBLATT.....</u>	<u>121</u>

I. Kurze Darstellung zu Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Ablauf, und wissenschaftlichem und technischem Stand

1. Aufgabenstellung

Als führendes Unternehmen und Pionier für Wasserstoffbetankungstechnologien sowie als Wasserstoffproduzent und -lieferant arbeitet die Linde AG aktiv am verstärkten Ausbau von H₂-Mobilitätsclustern. Die Einführung von Wasserstoff als Kraftstoff ist ein technisch und insbesondere wirtschaftlich herausforderndes Unterfangen. Vor diesem Hintergrund beantragte die Linde AG für das Projekt „Linde Hydrogen Mobility Concept“ (LHMC) Zuwendung aus dem Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II).

Die Wasserstofftechnologie in Deutschland hat in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte gemacht. Tankstellen (engl. Hydrogen Refueling Stations, HRS) und Brennstoffzellenfahrzeuge (engl. Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) werden technisch weiterentwickelt, um Marktreife zu erreichen. Allerdings fehlen bislang durch Forschungsvorhaben validierte Erkenntnisse und Daten bezüglich der Synchronisation zwischen beiden Technologien und der Akzeptanz durch den Endnutzer.

Aus diesem Grund brachte Linde im Sommer 2016 eine Flotte von 50 FCEV im Großraum München auf die Straße. Diese FCEV wurden im Rahmen des Linde-Projekts „BeeZero“ (www.BeeZero.com) im der Projektlaufzeit von privaten Endnutzern in Form eines Carsharing-Konzeptes genutzt. Hierdurch wurde die Technologie für die Endnutzer selbst erfahrbar und die Akzeptanz der Technologie in der Bevölkerung erprobbar. Übergeordnetes Ziel des Projektes LHMC war die Ermittlung von Forschungserkenntnissen über H₂-Mobilitätscluster. Hierbei grenzte sich das Forschungsvorhaben klar von den bereits durchgeführten Carsharing-Aktivitäten ab, da es sich hierbei um das weltweit erste Carsharing-Konzept mit wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen handelte. Für die Carsharing-Aktivitäten und die dafür benötigten Fahrzeuge und IT-Systeme hat die Linde AG keine Fördermittel erhalten.

Die Erkenntnisse aus dem LHMC sollen helfen, die Weiterentwicklung des Tanksystems und des Infrastrukturkonzeptes voran zu treiben. Es fehlt mangels Cluster, die eine hohe Auslastung beider Technologien prüfen, an Forschungsergebnissen und Erkenntnissen in Bezug auf regelmäßige Nutzung des Tanksystems und die Evaluation bestehender Tankstelleninfrastruktur bezüglich geographischer Verteilung, Verkehrsanbindung und Tankvorgänge.

Tankstellensysteme und Komponenten in bestehenden Tanksystemen sind in den meisten Fällen aufgrund mangelnder Fahrzeugdichte bei den FCEV nur unzureichend ausgelastet, um gesicherte Aussagen über Technologieverhalten und Zuverlässigkeit unter hoher Last / Volllast treffen zu können. Ursächlich hierfür ist die geringe Anzahl von FCEV. Um diese Technologie für zukünftige Anwendungen bei angepeilter höherer Fahrzeugdichte gezielt weiter entwickeln zu können, sind die Daten, die im Rahmen des Projektes gesammelt wurden, eine existenzielle Grundlage.

Das Projekt wurde in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (Prof. Lienkamp) der Technischen Universität München durchgeführt. Die zu erarbeitenden

Ergebnisse strukturierten sich entlang der folgenden Arbeitspakete und Fragestellungen:

Arbeitspaket 1: Forschungsvorhaben FCEV

- AP 1.1: Analyse der Fahrzeugeigenschaften im Realbetrieb (Linde/TUM)
- AP 1.2: Modellbildung und Simulation FCEV (TUM)
- AP 1.3: Technologievergleich FCEV/BEV/ICEV (TUM)
- AP 1.4: Optimierung der Fahrzeugeigenschaften für den Flotteneinsatz (TUM)

Arbeitspaket 2: Forschungsvorhaben H₂-Infrastruktur

- AP 2.1: Erforschung Tankstellenlage / HRS-Standort (Linde)
- AP 2.2: Erforschung Nutzungsdaten HRS – Tankstellenkomponenten (Linde)
- AP 2.3: Erforschung Nutzungsdaten HRS – Wasserstoffabgabe (Linde)
- AP 2.4: Erforschung Nutzungsdaten HRS – Zuverlässigkeit (Linde)
- AP 2.5: Auslegung optimales Tankstellennetzwerks für den Großraum München (TUM)
- AP 2.6: Überregionale Infrastrukturplanung für den flächendeckenden Einsatz von FCEV (TUM)
- AP 2.7: Erforschung Net-Promoter-Score zur Tankstellenakzeptanz (Linde)

Arbeitspaket 3: Forschungsvorhaben Endnutzer

- AP 3.1: Analyse des globalen Mobilitätsverhaltens (Linde/TUM)
- AP 3.2: Analyse räumlich/zeitlicher Einflussfaktoren auf das Mobilitätsverhalten (TUM)
- AP 3.3: Modellierung des Gesamtsystems in einer agenten-basierten Simulationsumgebung (TUM)
- AP 3.4: Optimierung des Carsharing-Konzepts (TUM)
- AP 3.5: Benchmark Carsharing-Konzepte (TUM)
- AP 3.6: Erforschung Nutzerprofile (Linde)
- AP 3.7: Erforschung Fahrmuster (Linde)
- AP 3.8: Erforschung Optimierung Nutzerprofile/Fahrmuster (Linde)

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Historisch steht die Wasserstoffmobilität vor einem klassischen „Henne-Ei“-Problem, da sich Ausbau der Tankstelleninfrastruktur und der FCEV-Rollout gegenseitig mit Hinweis auf Mangel der jeweils anderen Technologie blockieren: Das zugrundeliegende Linde-Carsharing-Projekt „BeeZero“ hat diesen Zusammenhang gezielt durchbrochen. Für Carsharing-Aktivitäten wurden in diesem Vorhaben keine Mittel beantragt, sie sind nicht Teil des Förderprogrammes NIP.

Betankungsinfrastruktur im Großraum München war durch die im Zuge des H₂-Projektes gebauten Tankstellen vorhanden. Die von Linde bereitgestellten Fahrzeuge hoben die Fahrzeugdichte bedeutend und die Wasserstoffmobilität konnte zum ersten Mal unter praxisnahen Bedingungen erprobt und demonstriert werden.

Die Technische Universität München hat sich in den vergangenen Jahren als eine der führenden Forschungseinrichtungen im Bereich der Elektromobilität etabliert. Der Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik war in der Vergangenheit in mehrere großangelegte Flottenversuche wie eMuc, eFlott (Förderkennzeichen: 03KP534B), sun2car@GAP (Förderkennzeichen MOD-1210-0008), VEM (Förderkennzeichen: 01ME12111) der Modellregion München involviert. Im Rahmen dieser Projekte konnte der Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik eine umfassende IT-Toollandschaft entwickeln, die es erlaubt in kurzer Zeit relevante Fragestellungen in Bezug auf das Mobilitätsverhalten, innovative Fahrzeugkonzepte und Infrastruktur zu beantworten. Der Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik verfügt daher über ein hohes Maß an Kompetenz im Bereich der Aufzeichnung, Aufbereitung, Speicherung und Auswertung von Mobilitätsdaten. Durch die vorhandene Datenbasis konnten in der Vergangenheit für unterschiedliche Problemstellungen Simulationsmodelle entwickelt werden. Neben einzelnen Fahrzeugen kann mit Hilfe eines agenten-basierten Simulationsansatzes das Verhalten ganzer Fahrzeugflotten unter Berücksichtigung realer Rahmenbedingungen untersucht werden.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Förderprojekt „Linde Hydrogen Mobility Concept“ wurde entsprechend dem nachfolgenden Arbeitsplan (siehe Abbildung 1) bearbeitet.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Industriegas Wasserstoff wird seit mehr als hundert Jahren in vielen industriellen Anwendungen eingesetzt. Seit mehr als vierzig Jahren wurde es zunächst in der Weltraumforschung als Raketentreibstoff und später auch als Kraftstoff für den Transport erforscht.

Der wesentliche Vorteil von Wasserstoff als Kraftstoff ist die emissionsfreie Mobilität bei gleichzeitig hoher Reichweite und kurzer Betankungsdauer. Diese Form der Elektromobilität kann ihren Nutzen vor allem auf größere Distanzen unter Beweis stellen. Aktuell gibt es nur vereinzelte Cluster des Infrastrukturaufbaus, z.B. in Japan, Kalifornien, und in Skandinavien, insbesondere im Großraum Oslo.

Alternative batterieelektrische Mobilität

Die aktuelle, öffentliche Diskussion über batterieelektrische Mobilität beherrscht die Medien. Die Antragssteller sehen ihre Aktivitäten jedoch nicht als konträre technische Lösung, sondern als ergänzende Form der Elektromobilität. Während batterieelektrische Fahrzeuge eindeutige Vorteile in Bezug auf Wirkungsgrade der Gesamtwertschöpfungskette haben und gerade bei regelmäßigen, gleichen Fahrstrecken und Kurzstrecken eingesetzt werden können, bieten die Brennstoffzellenfahrzeuge die Vorteile Flexibilität, große Reichweite und kurze Betankungszeiten sowie in Kombination mit Power-to-Gas-Projekten (Energiepark Mainz) die Möglichkeit der Speicherung volatiler erneuerbarer Energie.

So ergänzen sich diese Technologien in verschiedenen Bereichen und ermöglichen einen emissionsfreien Verkehr. Auch sind weite Teile der Antriebstechnologie und das Know-how bezüglich der Elektrifizierung der Antriebe komplementär oder bauen zumindest auf gleichen Grundlagen auf.

Während es bereits Flottenversuche bezüglich batterieelektrischer Mobilität gegeben hat, sind im gleichen Stil noch keine vergleichbaren flächendeckenden Forschungsvorhaben bezüglich Brennstoffzellenfahrzeugen und der Wasserstofftankstelleninfrastruktur durchgeführt worden. Durch das Projekt werden erstmals Beiträge zu den Fragestellungen Nutzerverhalten, Nutzeranforderungen und großflächiger Tankstelleninfrastrukturkonzepte im Bereich Wasserstoffmobilität geleistet. Auf dieser Basis wurden Entscheidungen bezüglich der Entwicklung in den Bereichen der Tankstellenentwicklung und dem Entwurf von Mobilitätsclustern für den weiteren flächendeckenden Ausbau der Technologie gefällt.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde in Kooperation mit der Technischen Universität München (TUM), Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, durchgeführt.

II. Eingehende Darstellung

1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

AP1: Forschungsvorhaben FCEV

1) AP 1.1: Analyse der Fahrzeugeigenschaften im Realbetrieb

a) Erkenntnisse aus dem Flottenversuch „BeeZero“

Die Zielsetzung des ersten Arbeitspaketes war die Untersuchung des Verhaltens von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen im Realbetrieb. Dabei wurden folgende Faktoren untersucht:

- Definition relevanter Fehler im Fahrbetrieb (Batterie, Brennstoffzelle, E-Motor, etc.)
- Anzahl relevanter Fehler pro Fahrzeug nach Woche/Monat
- Gefahrene Distanzen pro Woche/Monat
- Fahrzeugverbrauch
- Wetterdaten (Temperatur, Luftfeuchtigkeit)

Im Zeitraum 2017-2018 wurden im Rahmen des Carsharing-Betriebs einige Fehler und Defekte durch Kundenrückmeldungen oder Anzeigen von Fehlern im Fahrzeug-Bordcomputer festgestellt. Diese Fehler wurden dem Fahrzeughersteller frühzeitig mitgeteilt und gemeinsam diskutiert, um Probleme im künftigen Einsatz möglichst vermeiden zu können. Durch eine frühzeitige Fehlerindikation und zielführende Zusammenarbeit des Konsortiums konnte eine notwendige Vermeidungsstrategie ausgearbeitet werden, sodass im Q2/2018 überhaupt keine Fehler mehr aufgetreten sind.

Zusammenfassend lassen sich folgende Feststellungen beim Probetrieb aufzählen:

- Carsharing-spezifische Komponenten haben Einfluss auf Energieverbräuche
 - Telematik-Box: NFC Geräte auf der Windschutzscheibe verbrauchen auch beim Stehen ein paar mA
 - Durch die Aktivierung der Wegfahrsperrung nach dem Schließen des Fahrzeuges, verbraucht die Telematiklösung weniger Strom, da die Fahrzeugschlüssel nicht vom Fahrzeug „gesucht“ werden
- Das Fahrverhalten der Nutzer hat großen Einfluss auf Verbräuche
- Hinsichtlich eines wetterabhängigen Musters bei den FCEV-Fahrzeugen konnten folgende Ergebnisse festgehalten werden:
 - „cold start“: Im Winter und bei niedrigen Temperaturen (unter 0°C) braucht das Fahrzeug ein Zeitfenster von 30 Sekunden bis 1 Minute, um die Brennstoffzelle aufzuwärmen und den Motor zu starten.
 - Beim Ausschalten des Motors wird im Winter die Luft aus den Röhren ausgeblasen. Dies kann ebenfalls einige Sekunden dauern und führt dazu, dass der Motor mehr Zeit (30 Sek – 1 Minute) zum Ausschalten braucht.

Ableitung einer optimalen Wartungsstrategie der Fahrzeuge

Die von Hyundai vorgegebene Wartungsstrategie ist nachfolgend dargestellt und wurde von dem Fahrzeugbetreiber (Hyundai) durchgeführt:

Tabelle 1: Wartungsstrategien für Wasserstoff-Fahrzeuge

Intervalle	Wartungen gemäß Wartungs-Checkliste
Zwischenwartung 10.000 km Durchzuführen nach 10.000 km Fahrleistung oder nach 12 Monaten, gerechnet ab dem Datum der Erstausslieferung bzw. Erstzulassung des Fahrzeuges, je nachdem was zuerst eintritt.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Arbeitsaufwand ✓ FCEV-Luftfilter ✓ FCEV-Kühlmittelfilter
Zwischenwartung 20.000 km Durchzuführen nach weiteren 10.000 km.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Arbeitsaufwand ✓ FCEV-Luftfilter ✓ FCEV-Kühlmittelfilter
Zwischenwartung 30.000-km- Durchzuführen nach 30.000 km Fahrleistung oder nach 24 Monaten, gerechnet ab dem Datum der Erstausslieferung bzw. Erstzulassung des Fahrzeuges, je nachdem was zuerst eintritt.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Arbeitsaufwand ✓ Bremsflüssigkeit wechseln ✓ Staub- und Pollenfilter ✓ FCEV-Luftfilter ✓ FCEV-Kühlmittelfilter
Zwischenwartung 40.000km Durchzuführen nach weiteren 10.000km.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Arbeitsaufwand ✓ FCEV-Luftfilter ✓ FCEV-Kühlmittelfilter
Zwischenwartung 50.000km Durchzuführen nach weiteren 10.000 km.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Arbeitsaufwand ✓ FCEV-Luftfilter ✓ FCEV-Kühlmittelfilter
Zwischenwartung 60.000km Durchzuführen nach 60.000 km Fahrleistung oder nach 36 Monaten, gerechnet ab dem Datum der Erstausslieferung bzw. Erstzulassung des Fahrzeuges, je nachdem was zuerst eintritt.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Arbeitsaufwand ✓ Motorkühlmittel - Brennstoffzelle ✓ FCEV-Luftfilter ✓ FCEV-Kühlmittelfilter ✓ Bremsflüssigkeit wechseln ✓ Staub- und Pollenfilter

Zuzüglich wurden folgenden Untersuchungen durchgeführt:

- Durchführung und Analyse der geplanten Wartungszyklen
- Auswertung, welche Wartungen häufiger, weniger häufiger oder anders durchgeführt werden sollten

Die Wartungszyklen wurden hierbei, wie von Hyundai vorgegeben, durchgeführt. Nur in Fällen von Defekten, wie oben beschrieben, wurden die Fahrzeuge häufiger zur Werkstatt gebracht. Da es keine Großserienfertigung war, war eine konsequente Prüfung notwendig. Der damit verknüpfte Aufwand für den Privatkunden, die geforderten Wartungsarbeiten regelmäßig durchführen zu müssen, ist nicht von Vorteil für die Attraktivität des Wasserstoff-Carsharings einzuschätzen. Als Konsequenz ist eine deutlich größere Anzahl an Wasserstoffautos in der Praxis notwendig, um den Wartungsaufwand für die Privatkunden möglichst gering zu halten.

b) Erkenntnisse aus den Rollenprüfstands- und Realfahrversuchen (TUM)

i. Versuchsplanung und Versuchsaufbau

Die Rollenprüfstands- und Realfahrversuchen zur Analyse der Fahrzeugeigenschaften des Wasserstofffahrzeugs im Realbetrieb werden mit einem Hyundai ix35 FC, einem Serienfahrzeug, durchgeführt. Abbildung 2 zeigt die einzelnen Untersuchungspunkte. Neben den Erkenntnissen über die Eigenschaften des FC-Fahrzeugs werden die experimentellen Daten zur Brennstoffzelle und der Betriebsstrategie zur Parametrierung des nachfolgenden Simulationsmodells genutzt. Die Gesamtfahrzeugdaten werden ebenfalls zur abschließenden Validierung des Simulationsergebnisses genutzt.

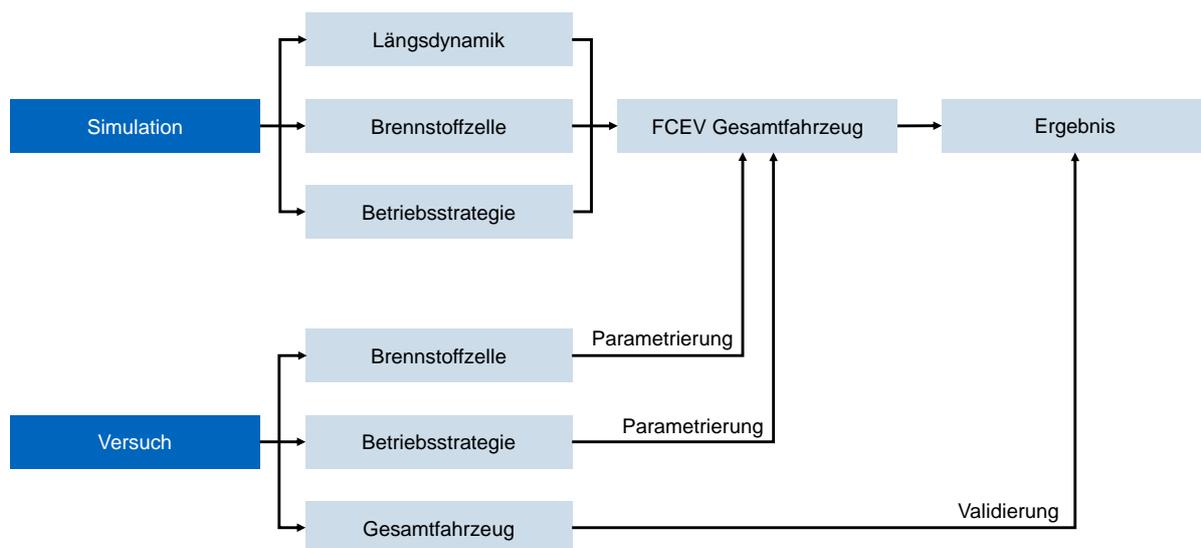


Abbildung 2: Vorgehensübersicht [4, p. 3]

Der Hyundai ix35 FC enthält eine Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle und wird von einem Asynchronmotor an der Vorderachse angetrieben [1, p. 3]. Der Brennstoffzellenstack besteht aus ca. 400 in Reihe geschalteten PEM-Brennstoffzellen [2, p. 27]. Der Brennstoffzellenantrieb hat eine maximale Leistung von 100 kW, beschleunigt wird das Fahrzeug in 12,5 s von 0 km/h auf 100 km/h und bis zu einer maximalen Geschwindigkeit von 160 km/h [1, p. 3]. Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau der Antriebsstrangkomponenten.

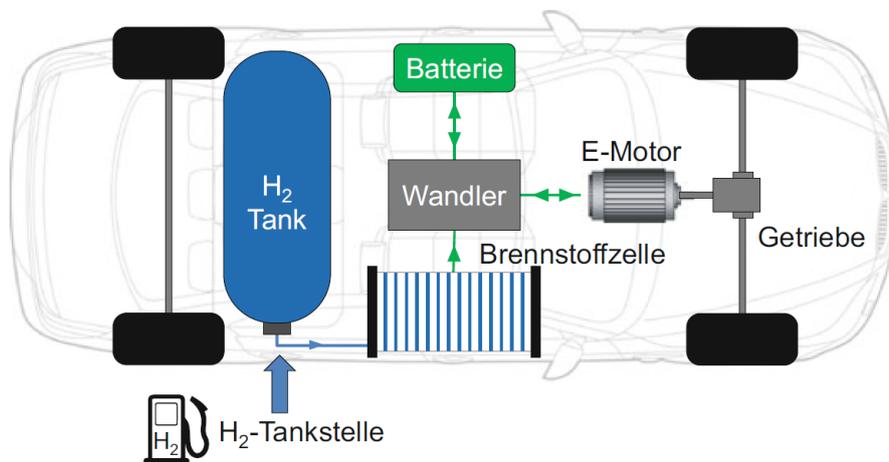


Abbildung 3: Antriebsstrangkomponenten des Hyundai ix35 FCEV [46, p. 178]

Das für die Experimente zur Verfügung stehende Fahrzeug wurde zuvor zwei Jahre in dem von der Linde AG eingesetzten Carsharing BeeZero im Raum München eingesetzt [3]. Das Fahrzeug hatte zu Beginn der Rollenprüfstands- und Realfahrversuchen einen Kilometerstand von ca. 8.000 km. Das Leergewicht des Fahrzeuges beträgt bei 90 % Tankfüllung und einem Fahrer (75 kg) 1.911 kg. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die einzelnen Fahrzeugparameter.

Tabelle 2: Fahrzeugparameter Hyundai ix35 FC

Parameter	Wert
Produktionsjahr	2015
Leergewicht	1911 kg
Massenverteilung	60:40
Höchstgeschwindigkeit	160 km/h [1]
Beschleunigung 0-100 km/h	12,5 s [1]
Normverbrauch	0,95 kg/100km (NEFZ) [1]
Reichweite	594 km (NEFZ) [1]
c_w -Wert	0,37
Stirnfläche	2,76 m ²
Reifentyp	225/60 R 17 Winter
Reifendruck	2,4 bar

Tabelle 3 gibt zusätzlich einen Überblick über die relevanten Parameter des Antriebsstrangs.

Tabelle 3: Antriebsstrangparameter Hyundai ix35 FC

Parameter	Wert
Kraftstofftyp	Wasserstoff
Tankkapazität	5,64 kg [1]
Brennstoffzellentyp	Polymer-Elektrolyt-Membran [1]
Zellenanzahl	400
Zellfläche	340 mm x 110 mm
Leistung der Brennstoffzelle	100 kW [1]
OCV-Spannung der Brennstoffzelle	380 V [1]
E-Maschinentyp	Asynchronmotor [1]
Drehmoment	300 Nm [1]
Akkumulatortyp	Lithium-Polymer [1]
Leistung des Akkumulators	24 kW [1]
Spannung des Akkumulators	180 V
Verschaltung des Akkumulators	48 s 1 p
Kapazität des Akkumulators	0,95 kWh [1]

Für die Untersuchungen wurde der Rollenprüfstand am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München genutzt. Hierbei handelt es sich um einen Scheitelrollenprüfstand. Der reale Prüfstands-aufbau mit gesichertem Fahrzeug ist in Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 4: Versuchsaufbau des Rollenprüfstands

Zur Messung aller relevanter Daten wurden zahlreiche Strom- und Spannungssensoren verbaut. Abbildung 5 zeigt schematisch den Verbau der einzelnen Stromsensoren im Fahrzeug.

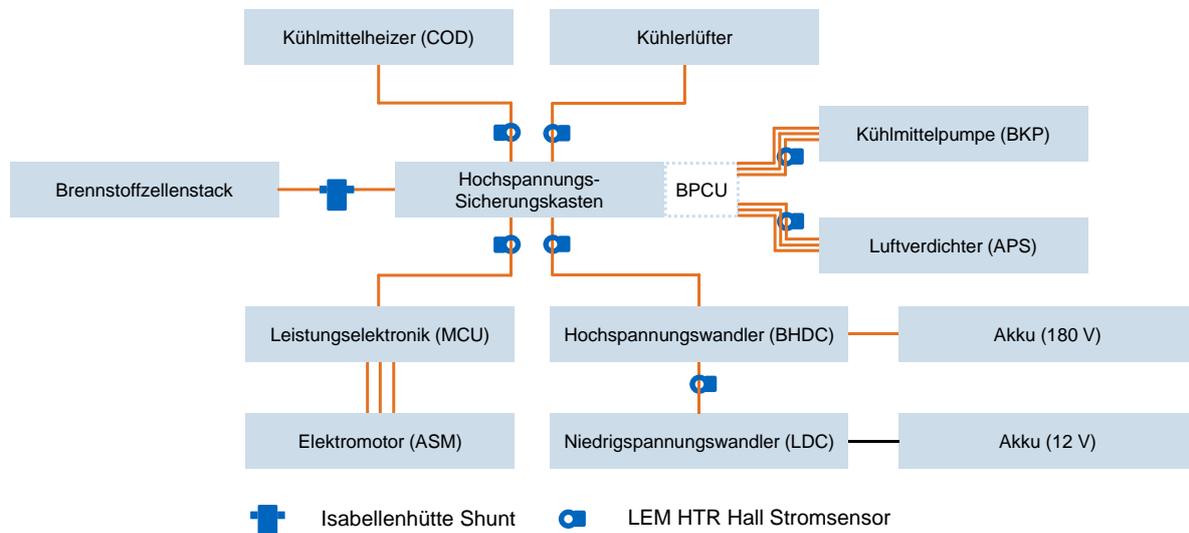


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Stromsensorenverbau im Fahrzeug [4, p. 78]

Zur Messung des Brennstoffzellenstroms wurde ein Isabellenhütten IVT-S 500 Shunt verbaut. Der Strom der E-Maschine wurde mit einem LEM HTR 500-SB nach der Leistungselektronik (MCU) und der Akkustrom nach dem Hochspannungswandler (BHDC) mit einem LEM HTR 200-SB gemessen. Die Leistungsaufnahme der einzelnen Sensoren beträgt maximal 80 mA sodass diese vernachlässigt werden können.

Die durchgeführten Rollenprüfstandsversuche lassen sich in Statische, Dynamische und standardisierte Fahrzyklen einteilen. Die wichtigsten Daten der durchgeführten standardisierten Fahrzyklen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Parameter der durchgeführten Fahrzyklen

Parameter	WLTP [5]	FTP-75 [6]	NEFZ [5]	CADC [7]
Dauer in s	1800	1877	1180	3142
Strecke in km	23,25	17,77	11	29,54
Standzeitanteil in %	13	19	25	8
Ø Geschwindigkeit in km/h	46,6	34,1	34	33,8
Max. Geschwindigkeit in km/h	131	91	120	130

ii. Ergebnisse der Prüfstands- und Realfahrversuche

Zunächst wurde eine Fahrwiderstandsbestimmung anhand von Ausrollversuchen durchgeführt. Das Ergebnis der Berechnung ist die Ausrollkurve des Hyundai ix35 FC

(Abbildung 6). Diese wurde bei den Rollenprüfstandsversuchen dazu genutzt, die Parametrierung des Prüfstands zu validieren.

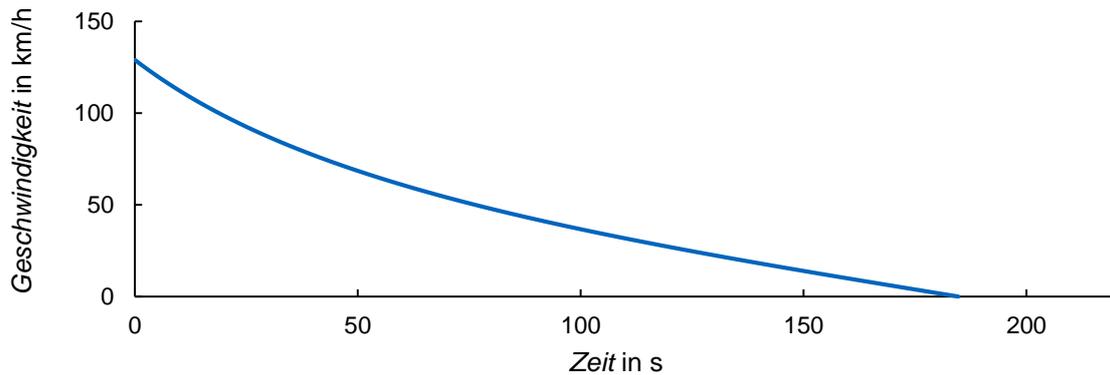


Abbildung 6: Ausrollkurve des Hyundai ix35 [4, p. 60]

Darüber hinaus liefert das Ergebnis der Berechnung die gesuchten Fahrwiderstandsparameter des Fahrzeuges (Tabelle 5).

Tabelle 5: Aus der Ausrollkurve errechnete Fahrwiderstandsparameter [4, p. 60]

Parameter	Wert
c_r	0.0112
c_d	0.37
A_f	2.76 m ²

Als erstes Hauptergebnis aus den Prüfstandsversuchen lässt sich die Wirkungsgradkennlinie der Brennstoffzelle des ix35 FC auf Basis der Verbrauchsdaten aller Kennfeld- und Verbrauchsversuche ableiten. Die Wirkungsgradkennlinie ist in Abbildung 7 dargestellt.

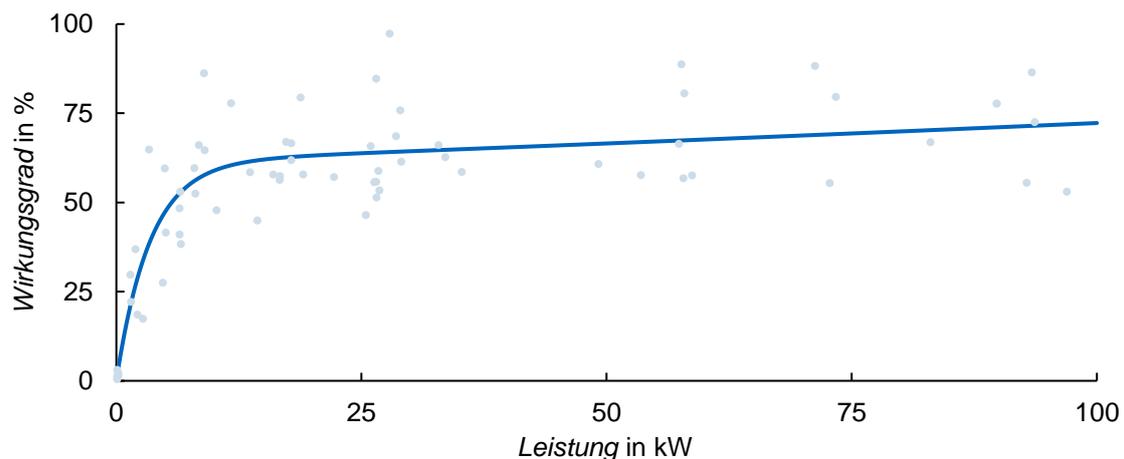


Abbildung 7: Wirkungsgradkennlinie der Brennstoffzelle des ix35 FC auf Basis der Verbrauchsdaten aller gültigen Kennfeld- und Verbrauchsversuche [4, p. 99]

(1) Prüfstandsversuche: Drehmoment-Drehzahl-Kennfeld

Für alle Prüfstandsversuche wurde in einem 400 Felder großen Raster über Drehmoment und Drehzahl feldweise der Median aller vorkommenden Wirkungsgrade gebildet und die entstehende Matrix mit einem Algorithmus nach [8] leicht geglättet (Glättungskoeffizient 0,2). Das entstehende Wirkungsgradkennfeld (in %) ist in Abbildung 8 dargestellt. Die über die schwarze Maximalmomentenlinie hinausgehenden Isolinien spiegeln keine realen Messwerte wider, sondern entstehen durch die Rasterung zur Mittelung der Wirkungsgrade.

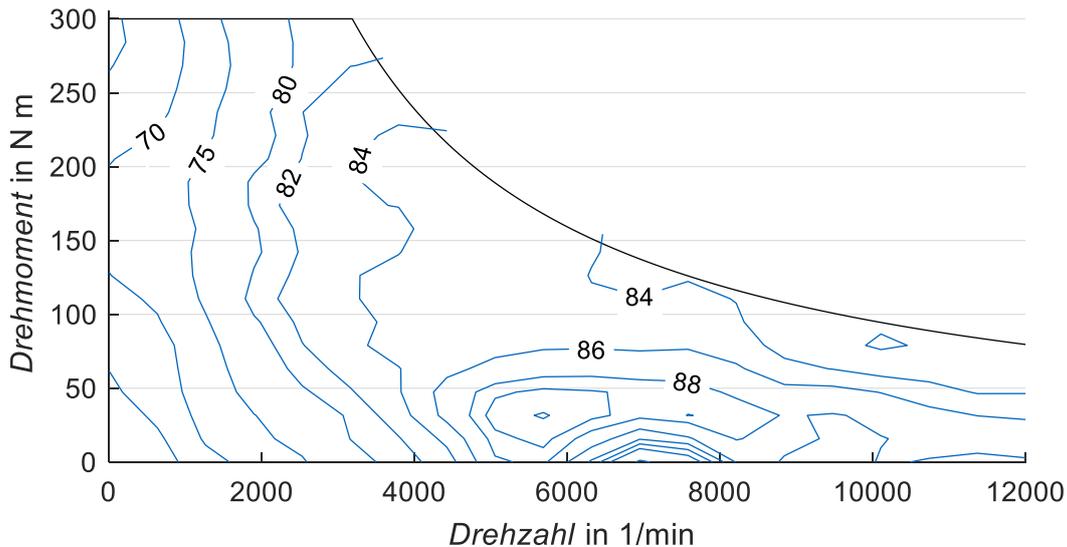


Abbildung 8: Wirkungsgradkennfeld MCU & Traktionsmaschine [9, p. 87]

Der maximale Wirkungsgrad liegt bei 90,1 % (5.700 1/min, 30 N m) und ist damit verhältnismäßig gering. Die elektrische Energie der Brennstoffzelle wird durch das Produkt aus Dauer und durchschnittlicher Brennstoffzellenleistung errechnet, die dem verbrauchten Wasserstoff entsprechende Energie über dessen Heizwert.

Neben dem Verhalten des Brennstoffzellensystems in quasi-stationären Zuständen, bietet die Auswertung der durchgeführten Lastsprungversuche die Möglichkeit, die Dynamik des Antriebsstrangs zu bewerten. Dies ließ sich beispielsweise durch einen Lastsprung des Fahrpedals von 0 % → 100 % abbilden. Zuvor wurde das Fahrzeug für drei Minuten mit geringer Last (30 % Fahrpedal) gefahren, damit der SOC des HV-Akkus sich in einem moderaten Bereich einstellt. Dadurch soll vermieden werden, dass der Akku beim Lastsprung aufgrund eines hohen SOC deutlich länger boostet als üblich. Nach diesen drei Minuten wird die Fahrpedalstellung für ca. 10 s auf 0 % gestellt (Abbildung 9).

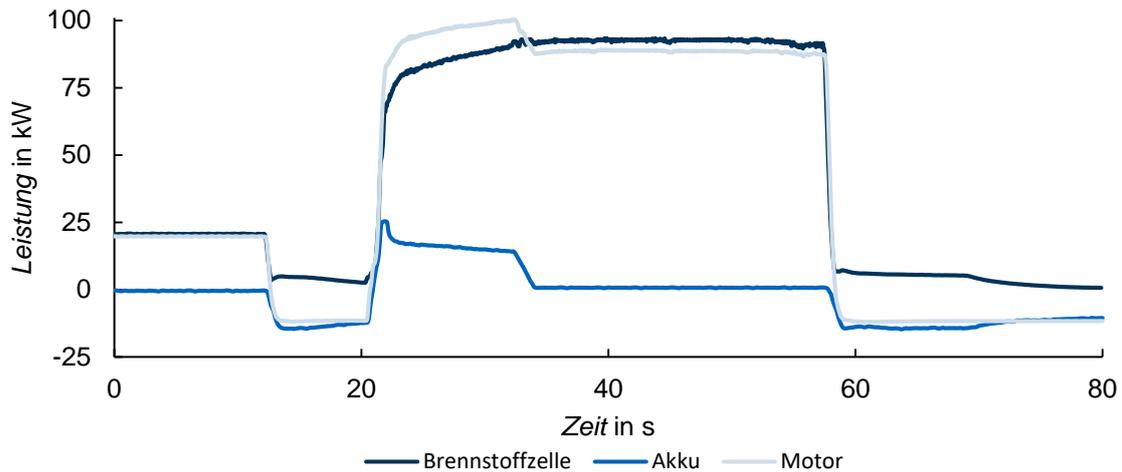


Abbildung 9: Verlauf der Leistungen der Brennstoffzelle, des Akkus und des Elektromotors im Lastsprungversuch [4, p. 106]

Die erste Reaktion der Brennstoffzelle erfolgt zeitgleich zum Anstieg des Fahrpedalwerts bei $t = 20,4$ s. Unter Berücksichtigung der Sendefrequenz der Signale liegt die Reaktion innerhalb von 0,1 s. Nachdem zum Zeitpunkt $t = 23,5$ s 80 kW erreicht werden, stellt sich ab $t = 33$ s der konstante Wert von 93 kW ein. Zusammenfassend erfolgt die erste Reaktion innerhalb von 0,1 s, 71 % der stationären Leistung sind nach 1,5 s erreicht und die stationäre Leistung stellt sich nach 12,6 s ein. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit der Hybridisierung des Antriebsstrangs mit einem Akku, damit das Fahrzeug einem Beschleunigungswunsch unmittelbar folgen kann.

Der Akku hält die maximalen 25 kW für 0,5 s und reduziert die abgegebene Leistung anschließend auf ca. 17 kW. Von diesem Punkt aus folgt eine langsame, lineare Reduktion auf 14 kW bis $t = 32,4$ s und eine schnelle Reduktion auf 0,5 kW. Die 0,5 kW werden anschließend dauerhaft weiter bereitgestellt.

Mit Reduktion der Fahrpedalstellung auf 0 % folgt ein steiler Abfall der Brennstoffzellenleistung auf ca. 7 kW bei $t = 58,3$ s. Diese 7 kW werden bis zum Zeitpunkt $t = 69,2$ s auf 5 kW reduziert und stellen ein Plateau dar. Die Leistung, die aus der Brennstoffzelle in diesem Zeitraum kommt, wird zusätzlich zu der Rekuperation des Elektromotors genutzt, um den Akku aufzuladen.

(2) Prüfstandsversuche: Verbrauch im NEFZ

Die offizielle Normangabe für den NEFZ weist einen Verbrauch von 0,95 kg/100km Wasserstoff und eine entsprechende Reichweite von 594 km aus [1, p. 3].

Die Verbrauchsauswertung der selbst durchgeführten Prüfstandsversuche ergibt für den Fahrmodus D im Schnitt einen Verbrauch von 1,00 kg/100km. Die ermittelten Verbräuche betragen im Fahrmodus E 1,06 kg/100km und im Fahrmodus L 1,01 kg/100km.

Die durch die Verbräuche induzierten Reichweiten sind zwischen 537 km (E) und 569 km (D) und liegen unter der offiziellen Angabe von 594 km [1].

(3) Prüfstandsversuche: Verbrauch im WLTP

Die aus den Verbräuchen resultierenden Reichweiten sind zwischen 549 km (E) und 510 km (L) und liegen wie erwartet unter der offiziellen Angabe von 594 km [1], die mit dem NEFZ ermittelt wird. Der Vergleich zwischen der durchschnittlichen Leistung der Brennstoffzelle und dem Verbrauch zeigt, dass obwohl in L die geringste Leistung auftritt, der Verbrauch dort am höchsten ist. Ein Grund kann das nichtlineare Wirkungsgradkennfeld der Brennstoffzelle darstellen. Die maximal auftretende Leistung der Brennstoffzelle liegt zwischen 60 kW und 63 kW und beträgt damit ca. 60 % der Maximalleistung. Der Vergleich zwischen den negativen Energien von Elektromotor und Akku zeigt, dass die Rekuperation durch den Elektromotor nicht ausreicht, um den Akku im gewünschten SOC-Bereich zu halten. Aus diesem Grund wird der Akku durch Lastpunktanhebung der Brennstoffzelle zusätzlich geladen. Die Differenz wird von D zu L geringer.

Tabelle 6: Durchschnittliche Antriebsstrangdaten für den WLTP

	D	E	L
Verbrauch in kg	0.25	0.24	0.26
Verbrauch in kg/100km	1.08	1.03	1.11
σ Verbrauch in %	4.8	4.9	2.5
Reichweite in km	526	549	510
\emptyset Leistung Brennstoffzelle in kW	10.05	9.77	9.53
Max. Leistung Brennstoffzelle in kW	63.07	60.70	59.49
Energie Brennstoffzelle in kW h	5.03	4.89	4.77
η Brennstoffzelle in %	59.5	60.6	54.9
Energie Elektromotor positiv in kW h	5.30	5.46	5.37
Energie Elektromotor negativ in kW h	-0.84	-1.05	-1.13
Energie Akku positiv in kW h	1.04	1.22	1.20
Energie Akku negativ in kW h	-1.11	-1.25	-1.29

Die benötigte Antriebsenergie, die sich in einen Anteil durch den Akku und der Brennstoffzelle aufteilt, ist in Fahrmodus E am höchsten, obwohl der Verbrauch am geringsten ist. Durch die höhere Rekuperation wird der Anteil der Energie aus dem Akku an der Gesamtenergie von 19 % (D) auf 22 % (E und L) angehoben, wodurch der Anteil der Brennstoffzelle reduziert wird. Die Differenz zwischen dem SOC des Akkus vor und nach dem Zyklus beträgt in allen Fahrten unter 15 %.

(4) Prüfstandsversuche: Verbrauch im FTP-75

Die Werte sind der Erwartung entsprechend aufgrund der niedrigeren Geschwindigkeiten geringer als im WLTP.

Die durch die Verbräuche indizierten Reichweiten sind zwischen 637 km (D) und 568 km (L) und befinden sich somit im Bereich der offiziellen Angabe von 594 km [1], die mit dem NEFZ ermittelt wird. Die durchschnittliche Leistung der Brennstoffzelle mit 6,3 kW sowie die maximal auftretenden Leistungen zwischen 47,5 kW und 50 kW (ca. 50 % der Maximalleistung) sind deutlich geringer als im WLTP.

Tabelle 7: Durchschnittliche Antriebsstrangdaten für den FTP-75

	D	E	L
Verbrauch in kg	0.16	0.18	0.18
Verbrauch in kg/100km	0.89	0.99	0.99
σ Verbrauch in %	6.37	5.89	5.08
Reichweite in km	637	572	568
\emptyset Leistung Brennstoffzelle in kW	6.16	6.41	6.3
Max. Leistung Brennstoffzelle in kW	50.01	47.94	47.48
Energie Brennstoffzelle in kW h	3.21	3.34	3.28
η Brennstoffzelle in %	59.1	55.3	54.0
Energie Elektromotor positiv in kW h	3.45	3.82	3.77
Energie Elektromotor negativ in kW h	-0.82	-1.07	-1.12
Energie Akku positiv in kW h	0.92	1.14	1.22
Energie Akku negativ in kW h	-1.05	-1.27	-1.37

(5) Realfahrversuche: Hochlast-Autobahnfahrt

Die Ergebnisse der Verbrauchsanalysen für den NEFZ und den FTP-75 zeigen tendenziell geringe Verbräuche. Durch die Analyse der Autobahn-Fahrten soll der maximal zu erwartende Verbrauch des ix35 FC untersucht werden.

Hierfür wurde eine Fahrt von Ingolstadt nach München über die A9 im Versuch (Abbildung 10, links) und eine Fahrt von Nürnberg nach Ingolstadt im Versuch (Abbildung 10, rechts) genutzt.

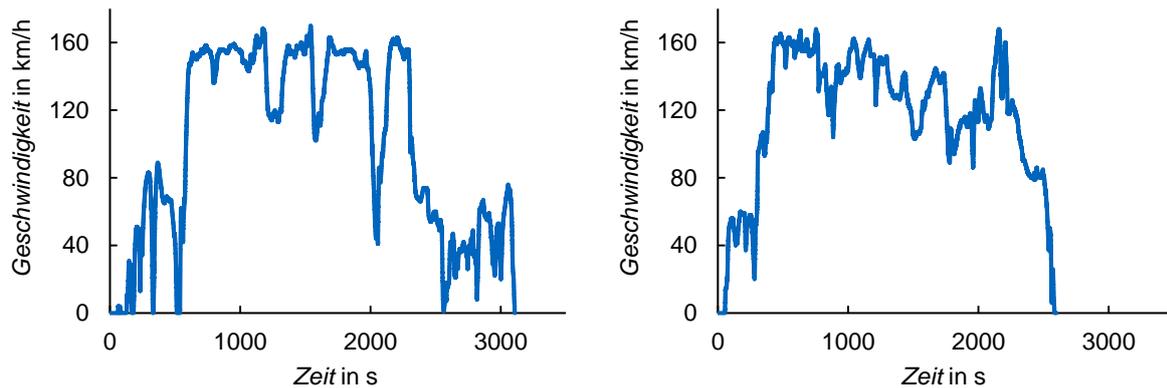


Abbildung 10: Geschwindigkeitsprofil der zwei detailliert ausgewerteten Autobahnfahrten [4, p. 124]

In beiden Fahrten wird eine Strecke von ca. 85 km zurückgelegt. Die durchschnittliche Geschwindigkeit liegt bei 101 km/h beziehungsweise 119 km/h, die maximale Geschwindigkeit in beiden Fahrten über 165 km/h. Zur anschließenden Auswertung wurden jeweils zwei Abschnitte herausgegriffen. Deren Daten sind nachfolgend dargestellt.

Tabelle 8: Längsdynamikenddaten der Autobahnfahrten

a.	^b IN - MUC	^c NBG - IN
^d Dauer in s	^e 150	^f 930
^g Strecke in km	^h 6,1	ⁱ 28,2
^j Ø Geschwindigkeit in km/h	^k 147	^l 109
^m Max. Geschwindigkeit in km/h	ⁿ 158	^o 168

Tabelle 9: Brennstoffzellen- und Verbrauchsdaten der Autobahnfahrten

p.	^q IN - MUC	^r NBG - IN
^s Ø Brennstoffzellenleistung in kW	^t 67	^u 50
^v Max. Brennstoffzellenleistung in kW	^w 74	^x 97
^y Wasserstoffverbrauch absolut in kg	^z 0,09	^{aa} 0,52
^{bb} Wasserstoffmassenfluss in kg/h	^{cc} 2,24	^{dd} 2,00
^{ee} Reichweite in km	^{ff} 371	^{gg} 307

Die höhere durchschnittliche Brennstoffzellenleistung in Fahrt 1 resultiert in einem höheren H₂-Massenstrom als in Fahrt 2. Die Verbräuche entsprechen 1,52 kg/100km in Fahrt 1 respektive 1,89 kg/100km in Fahrt 2 und stellen das obere Limit des zu erwartenden Verbrauchs dar. Zu beachten ist, dass der absolute Verbrauch im Intervall der Fahrt 1 mit 0,09 kg klein und somit die Auswirkung eines Kalkulationsfehlers der Tankberechnung groß ist. Somit stellt sich der Verbrauchswert von Fahrt 2 mit

1,89 kg/100km belastbarer dar und kann als maximales oberes Limit des Verbrauchs im Kundenbetrieb angenommen werden.

(6) Realfahrversuche: „Kreibich-Runde“

Abschließen wurden Realfahrversuche auf einer festgelegten Rundstrecke „Kreibich-Runde“ durchgeführt. Die Streckenlänge von 18,79 km teilt sich in 67 % Stadt, 22 % Überland und 11 % Autobahn auf.

Der für das Intervall jeder Fahrt ausgewertete Verbrauch entspricht im Mittel einem Verbrauch von 0,95 kg/100km (Abbildung 11). Dies gleicht exakt der offiziellen Angabe [1], die mit dem NEFZ ermittelt wird. Die Fahrten 7 bis 9 (grau dargestellt) werden aufgrund verfälschten Verbrauchsermittlungen durch das Temperatursensorenlimit nicht berücksichtigt. In den Fahrten 1 sowie 21 bis 25 ist neben dem Fahrer ein weiterer Passagier im Fahrzeug gesessen. Diese Fahrten weisen ebenfalls alle einen überdurchschnittlichen Verbrauch auf.

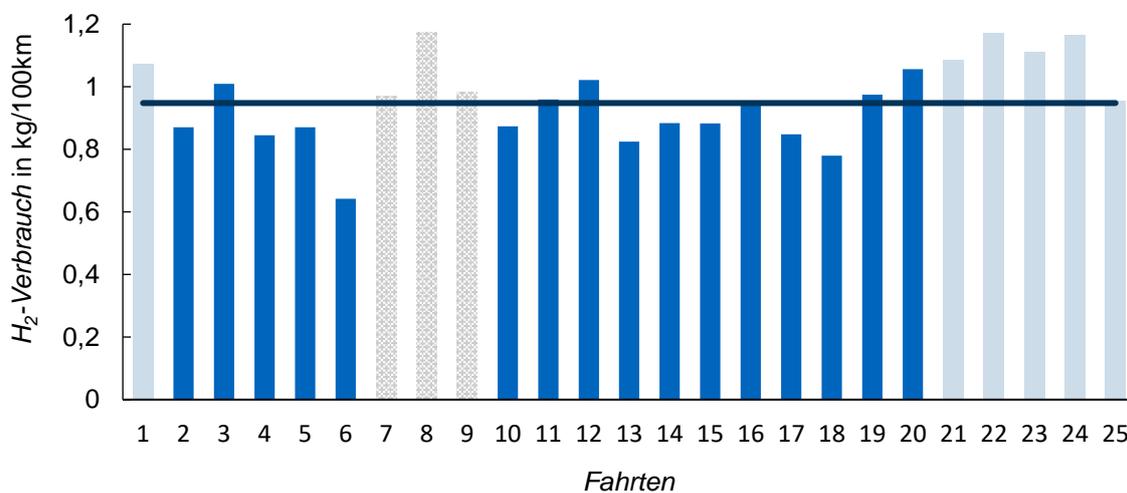


Abbildung 11: H₂-Verbrauchs auf Basis der Ergebnisse der einzelnen „Kreibich-Runden“

Die durchschnittliche Leistung der Brennstoffzelle mit 7 kW liegt im Bereich des NEFZ auf dem Rollenprüfstand. Der Verbrauch zwischen 0,64 kg/100km und 1,17 kg/100km resultiert in Reichweitenprognosen zwischen 481 km und 879 km (Tabelle 10). Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle beträgt durchschnittlich 63 %.

Tabelle 10: Verbrauchsdaten der „Kreibich-Runden“

	Minimum	Mittelwert	Maximum
Ø Brennstoffzellenleistung in kW	5,35	7,11	8,01
H ₂ -Verbrauch in kg	0,12	0,18	0,22
H ₂ -Verbrauch in kg/100km	0,64	0,95	1,17
H ₂ -Energieverbrauch in kW h	3,96	5,87	7,27
H ₂ -Energieverbrauch in kW h/100km	21,39	31,59	39,04
Reichweite in km	481	607	879
Wirkungsgrad Brennstoffzelle in %	55,6	63,2	73,4

Die Aufteilung der benötigten Energie des Elektromotors in die Anteile der Brennstoffzelle und des Akkus zeigt einen hohen Anteil des Akkus von 28 % (Abbildung 12). Der durchschnittliche Antriebsenergiebedarf beträgt 3,73 kW h.

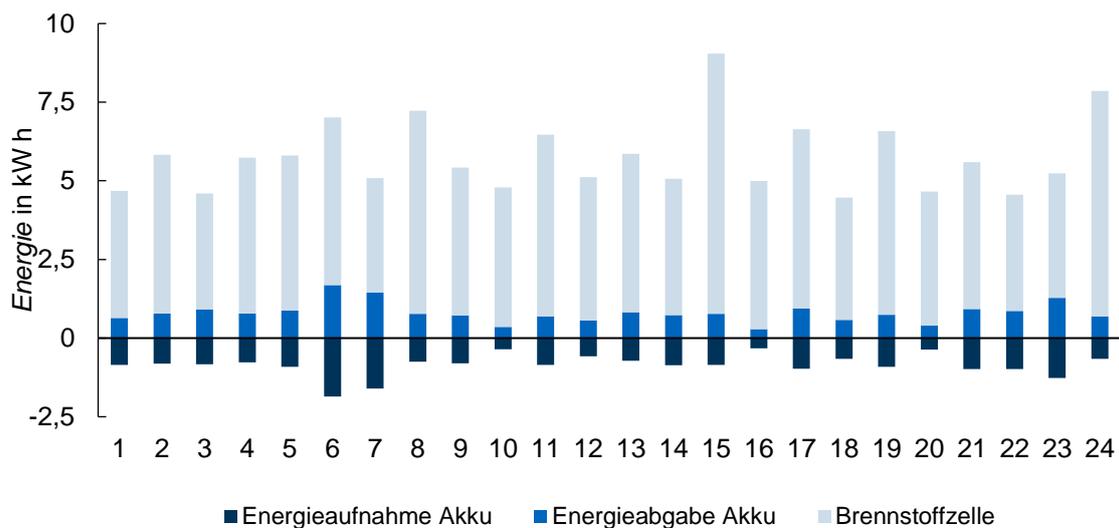


Abbildung 12: Aufteilung der Energiebereitstellung in den „Kreibich-Runden“ [4, p. 134]

(7) Betriebsstrategien

Die Analyse des Betriebsverhaltens hatte zum Ziel, Rückschlüsse auf Applikation und Logik der Betriebsstrategie zu ermöglichen. In Abbildung 13 ist die Eingangsleistung der MCU bei Volllast dargestellt. In der Fahrstufe E wird das Moment der E-Maschine beim Übergang vom Grunddrehzahl- zum Feldschwächbereich zurückgenommen.

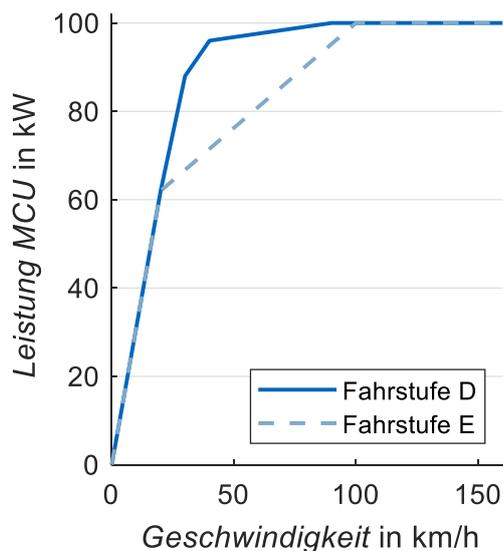


Abbildung 13: Eingangsleistung der MCU bei Volllast [9, p. 89]

Das Fahrzeug ist elektronisch auf 170 km/h limitiert, diese Grenze konnte allerdings nur in einem Versuch erreicht werden. Es konnte keine motorseitige thermische Begrenzung festgestellt werden, die maximale aufgezeichnete Motortemperatur lag bei 134 °C, die maximale MCU-Invertertemperatur bei 58 °C.

Im Fall des HV-Speichersystems ergibt sich ein mehrdimensionales Problem, da die Entscheidung über die Energieflüsse zwischen den drei Hauptkomponenten des Antriebssystems mindestens die Fahrereingabe und den Ladezustand des Speichers einbeziehen muss. In einem Diagramm, das die stationären Betriebspunkte aller Prüfstandsversuche über Leistung der MCU und Ladezustand des HV-Speichers (SOC) anhand ihrer Leistung des HDC (HV-Batterie-Leistungselektronik) aufträgt, sind starke Regelmäßigkeiten zu erkennen. Überschüssige Brennstoffzellenenergie, z. B. bei einem negativen Lastwechsel wurde in den ausgewerteten Versuchen grundsätzlich zusätzlich in den HV-Speicher geladen bzw. dessen Last dadurch reduziert. Abbildung 14 zeigt die entstehende Punktwolke mit farblich gruppierten Betriebspunkten.

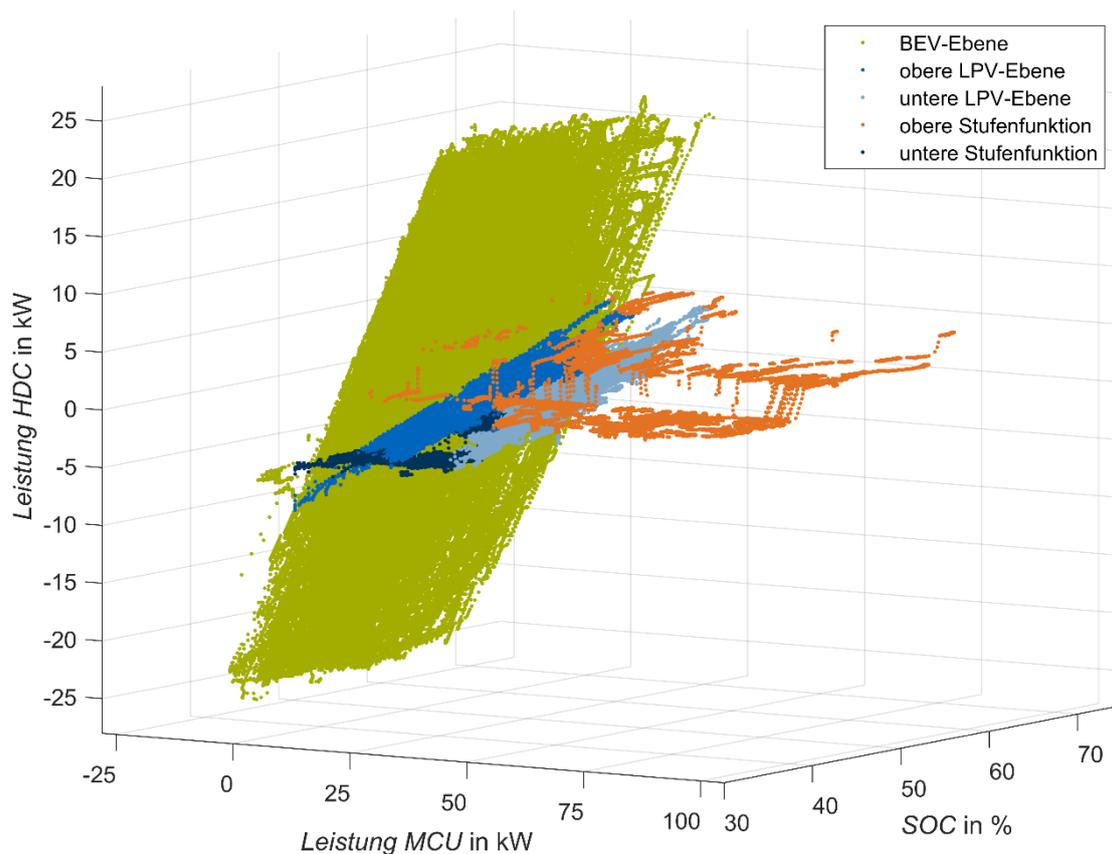


Abbildung 14: Betriebsverhalten Leistungsaufteilung [9, p. 91]

Eine um die SOC-Achse schiefe Ebene (grün) wird klar sichtbar, stellt den rein batterieelektrischen Betrieb dar. Ihr Gradient in MCU-Leistungsrichtung beträgt nahezu 1, unter Vernachlässigung von Verlusten und Nebenverbrauchern ist die MCU-Leistung also gleich der Leistung des HV-Speichersystems. Aufgrund der Leistungsbilanz am HV-Verteiler muss daher die Brennstoffzelle deaktiviert sein. Die BEV-Ebene ist bei 42,5 und 71,5 % SOC sowie 22 und -26 kW begrenzt. Die Differenz der positiven und negativen Maximalleistung ergibt sich durch die ausschließliche Berücksichtigung des HDC-Wirkungsgrades bei positiver Antriebsleistung. Bis auf die untere Kante, die die maximale Rekuperation über dem SOC darstellt, sind alle Grenzen auf die Grundebene projiziert parallel zu einer Achse. Dies bedeutet, dass über den gesamten genannten SOC-Bereich die maximale Antriebsleistung von 22 kW zur Verfügung steht. Sie enthält eine Anhäufung von Punkten ungeklärter Herkunft bei einer HDC-Leistung von 1,75 kW über den gesamten SOC-Bereich (horizontale Linie).

Die freigegebene Rekuperationsleistung ist nicht nur vom Ladezustand, sondern auch von Geschwindigkeit und Fahrstufe abhängig. Dieses Verhalten wurde in den Rekuperationsversuchen mit 0 % Fahrpedalstellung vermessen und ist in Abbildung 15 dargestellt.

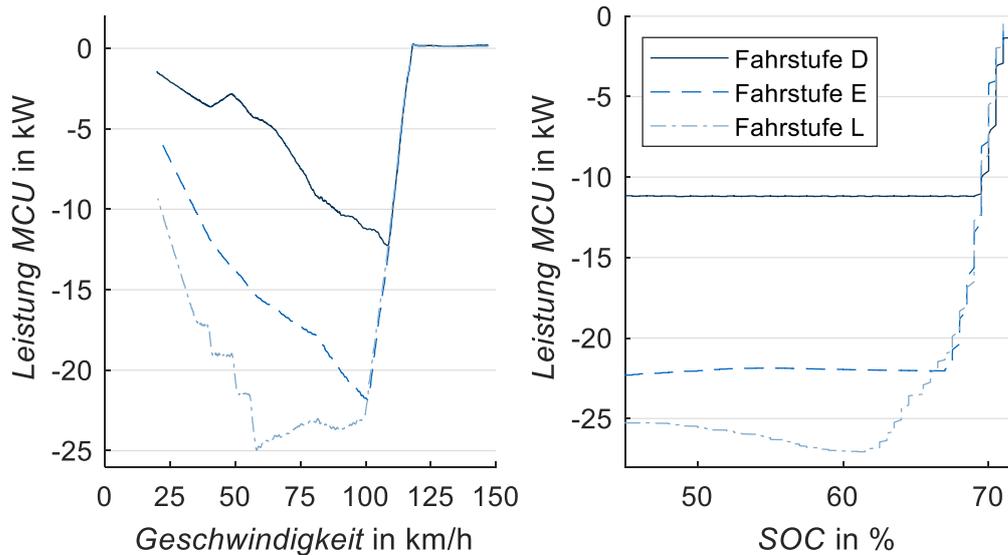


Abbildung 15: Einhüllende des Maximal-Rekuperationsverhalten [9, p. 92]

Das inhomogene geschwindigkeitsabhängige Verhalten, vor allem die vollständige Einstellung oberhalb von 118 km/h ist im Fahrbetrieb spürbar. Unterhalb von ca. 12 km/h findet ebenfalls keine Rekuperation statt. Das SOC-abhängige Verhalten sorgt dafür, dass 71,5 % SOC im Normalfall nicht überschritten werden.

2) AP 1.2: Modellbildung und Simulation FCEV (TUM)

Im Rahmen des Projekts wurde ein Längsdynamiksimulationsmodell für ein FCHV entwickelt und für den unter II.1.1).b) vermessenen Hyundai ix35 FC parametrisiert und validiert. Eine umfangreiche Validierung des Modells wurde im Rahmen einer internationalen Fachtagung bereits veröffentlicht [10]. Deshalb konzentriert sich der vorliegende Abschlussbericht auf den Aufbau und die Parametrierung des Modells.

Ziel des Modells ist die hinreichend genaue Abbildung der Längsdynamik des vermessenen Fahrzeugs und seiner Komponenten. Hierzu gehört auch die Implementierung verschiedener Betriebsstrategien, welche den Leistungsfluss zwischen Brennstoffzellensystem, Hochvoltspeicher und Traktionsmotor steuern. Die generelle Struktur des Modells basiert auf einer am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik existierenden Komponentenbibliothek. Das Modell ist nach dem Prinzip der Vorwärtssimulation aufgebaut, in Abbildung 16 ist der Aufbau des Modells schematisch dargestellt. Das Modell ist in MATLAB / Simulink implementiert und weist eine streng lineare Topologie auf, was bedeutet, dass der gesamte Datenbus mit nur einem Memory Block auskommt. Dies gewährleistet ein rechnerisch effizientes und dennoch physikalisch korrektes (in Bezug auf Zeitverzögerungen im Datenbus, der durch algebraische Schleifen verursacht wird) Modellverhalten. Der modulare Modellaufbau erlaubt eine Anpassung von BEVs zu FCHVs durch Austauschen der Schlüsselkomponenten.

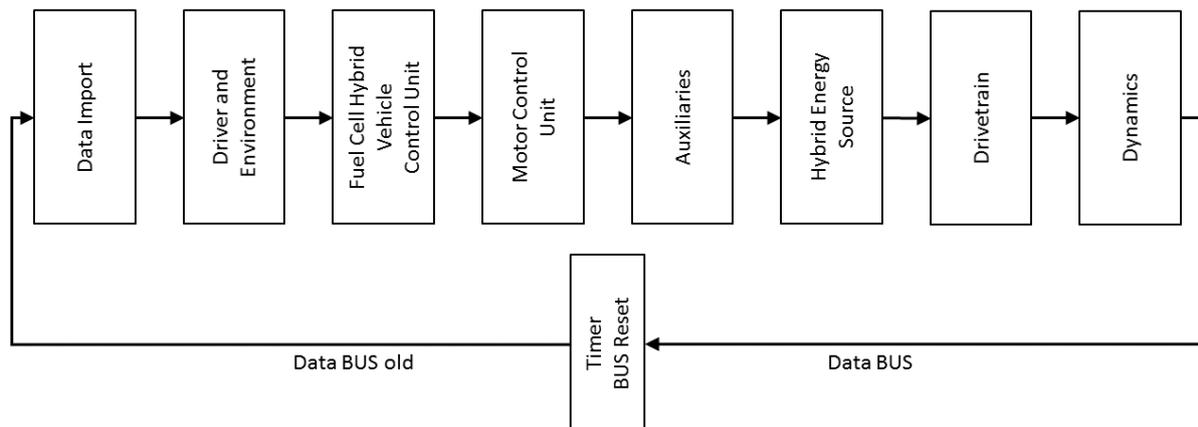


Abbildung 16: Schematischer Überblick über das Konzept und die Struktur des Längsdynamiksimulationsmodells

a) Auswahl des Fahrzyklus (Data Import)

Im Modul Data Import werden die Daten aus den Rollenprüfstandsversuchen importiert. Dabei dienen die gemessenen Geschwindigkeitsverläufe als Input für das Modell und die komponentenspezifischen Größen als Validierungsgrundlage.

b) Fahrermodell und Randbedingungen (Driver and Environment)

Das Modul Driver and Environment beinhaltet einerseits ein Fahrermodell und andererseits werden hier die Umgebungsbedingungen für das Fahrzeug festgelegt.

Das Fahrermodell besteht aus einem Fahrpedalregler (PI-Regler) mit Vorsteuerung und einem Bremspedalregler (PI-Regler), die in Abhängigkeit der Sollgeschwindigkeit angesteuert werden. In der Vorsteuerung wird das Quadrat der aktuellen Geschwindigkeit mit dem Quadrat der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit verglichen (aufgrund der quadratischen Relation zwischen Geschwindigkeit und Luftwiderstandswert) und mit einem Wert von 0,25 (25% Fahrpedalstellung bei maximaler Geschwindigkeit) multipliziert. Der resultierende Wert wird zum Stellwert des eigentlichen PI-Reglers im Fahrpedalmodell addiert. Bei Reglern mit Integralanteil kann der sogenannte Wind-up-Effekt auftreten, welcher zu unerwünschten Schwingungen des Reglers führt. Um dies zu verhindern, wird der Integralanteil des Bremspedal- und Fahrpedalreglers bei geringen Differenzen zwischen Soll- und Ist-Geschwindigkeit verringert. Falls ein Bremspedalsignal vorliegt, wird automatisch das Fahrpedalsignal deaktiviert.

Aus dem Submodell Environment werden die Umgebungsbedingungen für das Fahrzeug ausgelesen. Hierzu gehören die Fahrbahnsteigung in rad, die Windgeschwindigkeit in Fahrzeuginnenrichtung (x-Koordinate im Fahrzeugkoordinatensystem) in m/s, die Umgebungstemperatur in K und der Umgebungsdruck in bar.

c) Zentrale Fahrzeugsteuereinheit (FCHVCU)

Die Steuereinheit des simulierten Fahrzeugs setzt sich aus zwei Submodellen zusammen. Hierzu gehört das Submodell Control Unit Simple für die Berechnung des

Solldrehmoments und die Steuereinheit, die die Betriebsstrategien beinhaltet (Control Unit FCHV).

i. Drehmomentvorgabe (Control Unit Simple)

In diesem Submodell erfolgt eine Berechnung des Solldrehmoments des Motors bzw. des Sollbremsmoments an der Radbremse aus den Signalen des Fahrpedals und des Bremspedals. Über eine Maske wird die Bremskraftverteilung, das maximale Motor- und das maximale Bremsmoment vorgegeben. Das Solldrehmoment wird aus der Multiplikation des Fahrpedalsignals mit dem maximalen Motordrehmoment ermittelt. Die Berechnung des Sollbremsmoments erfolgt analog mit dem maximal verfügbaren Bremsmoment mit anschließender Bremskraftverteilung auf die Vorder- und die Hinterachse gemäß dem Maskenparameter.

ii. Betriebsstrategien (Control Unit FCHV)

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Betriebsstrategien implementiert und verglichen, um Rückschlüsse auf die im Realfahrzeug tatsächlich implementierte Betriebsstrategie ziehen zu können.

(1) Steuerungskennlinie

Ausgangspunkt dieser regelbasierten Strategie ist der Betrieb der Brennstoffzelle mit maximal möglichem Wirkungsgrad, um den Wasserstoffverbrauch so gering wie möglich zu halten. Der optimale Betriebspunkt der *primären Quelle* PQ (Brennstoffzelle) wird durch die Lastpunktanhebung bzw. die Lastpunktabsenkung mithilfe der *reversiblen Quelle* RQ (Hochvoltbatterie) erreicht. Bei der Lastpunktanhebung wird die RQ geladen und bei Lastpunktabsenkung entladen. Anhand der Wirkungsgrade der Brennstoffzelle und des Hochvoltspeichers werden die Einsparungen durch Lastpunktverschiebung über die Gleichungen (II.1) und (II.2) ermittelt. Mithilfe der Einsparungen kann anschließend eine Steuerungskennlinie berechnet werden, welche die optimale Brennstoffzellenleistung bei einer definierten geforderten Leistung ausgibt.

$$P_{\text{Einsparung,LP+}} = \frac{P_{\text{erf}}}{\eta_{\text{PQ}}} - \frac{P_{\text{erf}} + P_{\text{RQ}}(1 - \eta_{\text{RQ}})}{\eta_{\text{PQ,LP+}}}, \quad P_{\text{RQ}} > 0 \quad (\text{II.1})$$

$$P_{\text{Einsparung,LP-}} = \frac{P_{\text{erf}}}{\eta_{\text{PQ}}} - \frac{P_{\text{erf}} - P_{\text{RQ}}\left(\frac{1}{\eta_{\text{RQ}}} - 1\right)}{\eta_{\text{PQ,LP+/-}}}, \quad P_{\text{RQ}} < 0 \quad (\text{II.2})$$

Der benötigte Wirkungsgradverlauf wird aus den Messwerten von speziellen Prüfstandversuchen zur Verbrauchs- und Wirkungsgradanalyse der Brennstoffzelle generiert. Hierzu gehören die Kennfeldversuche und die Verbrauchsversuche (H2 Extended) in der Messdatenbank. Für die Berechnung des Wirkungsgrades wird Gleichung (II.3) herangezogen.

$$\eta_{\text{BZ}} = \frac{P_{\text{BZ},\emptyset}}{E_{\text{H}_2} \cdot 3600} \Delta t \quad (\text{II.3})$$

$P_{BZ,mean}$ stellt hierbei die mittlere Brennstoffzellenleistung des Versuchs dar. E_{H_2} ist die Energie des verbrauchten Wasserstoffs und Δt die Dauer des Versuchs. Für die Verbrauchsberechnung wurden Temperatursensoren herangezogen. Aufgrund der eingeschränkten Funktion der Sensoren unterhalb von -40 °C ist ein Teil der Messwerte ungültig. Für die gültigen Messpunkte wird über eine Regressionsanalyse der Wirkungsgradverlauf ermittelt, welcher mit den gültigen bzw. ungültigen Messwerten in Abbildung 17 dargestellt ist.

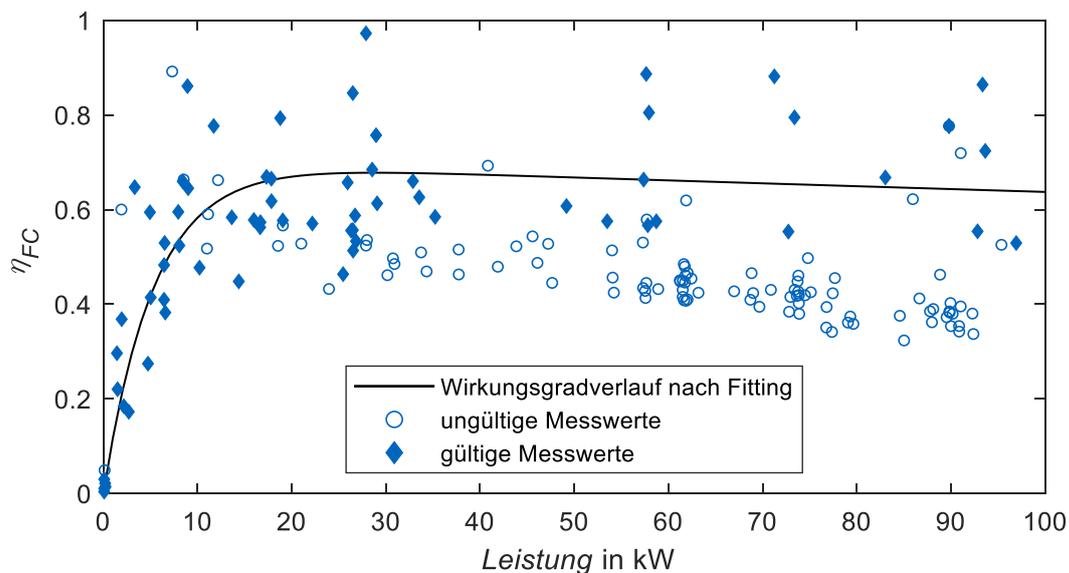


Abbildung 17: Wirkungsgradverlauf der Brennstoffzelle nach Regressionsanalyse

Die Analyse wurde mit der Funktion Exponential des Curve Fitting Tools des Programms Matlab durchgeführt. Die Qualität der Regressionsanalyse kann mit einem Bestimmtheitsmaß 91,65% und einem Root Mean Square Error (RMSE) von 0,077 beschrieben werden. Der Wirkungsgradverlauf aus Abbildung 17 ist in Gleichung (II.4) als Funktion der Brennstoffzellenleistung P_{BZ} definiert. Die Parameter der Gleichung sind in Tabelle 11 festgehalten.

$$\eta_{BZ}(P_{BZ}) = ae^{bP_{BZ}} + ce^{dP_{BZ}} \quad (\text{II.4})$$

Tabelle 11 : Parameter der angenäherten Wirkungsgradkurve der Brennstoffzelle in Gleichung (II.4)

Parameter	Wert
a	-70.06
b	-0.1847
c	70
d	-0.0009371

Da für den Hochvoltpeicher kein Wirkungsgradverlauf vorliegt, wird dieser aus der Literatur übernommen. Bei Anwendung dieser Betriebsstrategie tritt das Problem auf,

dass Leistung von der Batterie abgefragt wird, auch wenn diese das SOC-Minimum erreicht hat. Um diesen Effekt zu vermeiden, wird das Modell dahingehend angepasst, dass in diesem Fall zur ermittelten Brennstoffzellenleistung die geforderte Batterieleistung addiert und die Batterie somit nicht mehr belastet wird.

(2) Peak Power Source-Strategie

Bei Betrieb der Energiesysteme in der Peak Power Source (PPS)-Strategie dient die Hochvoltbatterie als Unterstützung der Brennstoffzelle bei hoher geforderter Leistung. Der Betrieb der Hochvoltbatterie stellt auf diese Weise sicher, dass die Brennstoffzelle in einem möglichst hohen Wirkungsgradbereich betrieben wird. Für die Steuerung des SOC ist ein PID-Regler implementiert, welcher den SOC zum Mittelwert zwischen vorgegebenem Maximum und Minimum regelt. Die Kenndaten der Batterie aus den Prüfstandversuchen weisen auf deren Betrieb als Peak Power Source hin.

(3) Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS)

In dieser Betriebsstrategie wird der Energieverbrauch der Brennstoffzelle und des Hochvoltspeichers auf Basis des Pontryagin'schen Minimum-Prinzips in ein Kraftstoffäquivalent umgerechnet. Hierbei handelt es sich um eine optimierungsbasierte Strategie, deren Ziel die Minimierung der Massenstromfunktion nach Gleichung (II.5) ist.

$$H(u) = \dot{m}_{\text{Kraftstoff}}(P_{\text{BZS}}(u)) + s_t(P_{\text{Bat}}(u)) \quad (\text{II.5})$$

s_t stellt den Äquivalenzfaktor dar, der aus dem Quotienten von durchschnittlichem Kraftstoffverbrauch und durchschnittlicher elektrischer Leistung für einen bestimmten Zyklus berechnet wird. Die Steuerungsgröße u legt die Leistungsaufteilung zwischen Brennstoffzelle und Hochvoltspeicher für jeden Zeitschritt fest. Die ECMS benötigt aufgrund der ausschließlich lokalen optimalen Berechnung zusätzlich einen P-Regler, welcher den Äquivalenzfaktor so regelt, dass der SOC sich stets zwischen einem vorgegebenen Minimum bzw. Maximum befindet. Die Reglerfunktion nach Gleichung (II.6) berechnet einen neuen Äquivalenzfaktor auf Basis von s_t , dem Proportionalfaktor des P-Reglers k_p , dem momentanen Ladezustand $SOC(t)$ und dem Sollladezustand SOC_{Soll} der Hochvoltbatterie. Äquivalenzfaktor s_t und Reglerparameter k_p können vom Anwender festgelegt werden.

$$s(t) = s_t - k_p(SOC(t) - SOC_{\text{Soll}}) \quad (\text{II.6})$$

d) Motorsteuereinheit (Motor Control Unit)

In der Motorsteuereinheit erfolgt eine Begrenzung des Drehmoments. Hierfür ist eine Kennlinie des maximalen Drehmoments hinterlegt. Zudem kann über dieses Modul der Komponentenbibliothek die Verlustleistungen des Elektromotors ausgegeben werden.

e) Verbraucher (Auxiliaries)

Im Modul Auxiliaries werden die Verbraucher des Brennstoffzellensystems berücksichtigt. Ein Invertermodell wird nicht implementiert, da die Verluste des Inverters im Kennfeld des Traktionsmotors bereits berücksichtigt sind.

i. Peripherie des Brennstoffzellensystems

Das Brennstoffzellensystem besitzt eine umfangreiche Peripherie. Anhand des Messdatenbestandes werden im Simulationsmodell die Leistung der Kühlmittelpumpe, des Lüfters und des Luftverdichters berücksichtigt.

(1) Lüfter

Da aufgrund unzureichender Auflösung des Brennstoffzellenmodells kein thermisches Modell der Brennstoffzelle in das Längsdynamikmodell integriert wird und da sich die Lüfterleistung über den Fahrzyklus überwiegend in einem begrenzten Leistungsfenster befindet, wird die Leistung des Lüfters über den zeitlichen Mittelwert angenähert. Dieser wird aus allen Versuchen zum entsprechenden Fahrzyklus ermittelt. Ein exemplarischer Verlauf der Lüfterleistung im WLTP ist in Abbildung 18 dargestellt.

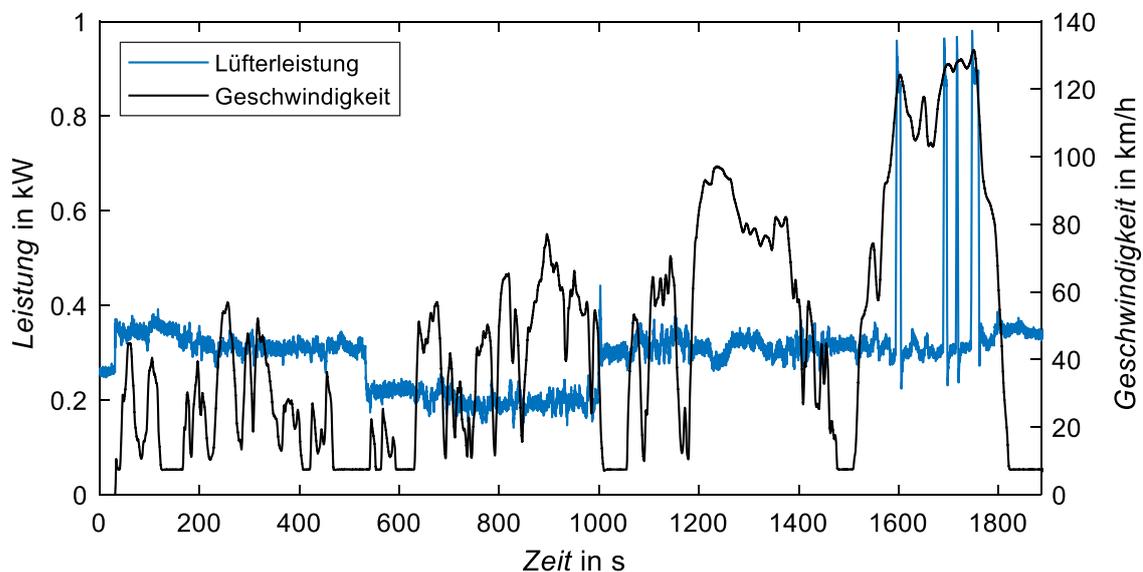


Abbildung 18: Leistungsverlauf des Lüfters im WLTP

(2) Luftverdichter und Blockkühlmittelpumpe

Im Gegensatz zum Lüfter, der mit Gleichspannung betrieben wird, werden der Luftverdichter und die Blockkühlmittelpumpe des Hyundai ix35 FC mit Wechselspannung gespeist. Bei der Messung des Wechselstroms und der Wechselspannung konnte das Signal aufgrund einer zu geringen Samplerate nicht hinreichend abgebildet werden. Aufgrund der unzureichenden Auflösung der Messwerte werden die zeitlichen Mittelwerte der Leistung des Verdichters und der Blockkühlmittelpumpe für die Simulation verwendet. Die Leistung wird über Gleichung (II.7), die das dreiphasige Drehstromnetz berücksichtigt, berechnet.

$$P_{\text{Verd/Pump}} = |U_{\text{Verd/Pump}} I_{\text{Verd/Pump}} \sqrt{3}| \quad (\text{II.7})$$

Da in den Fahrzyklen die Peripherie aufgrund verschiedener Leistungsprofile unterschiedlich beansprucht wird, werden die Mittelwerte der Peripherie nur für den jeweiligen Fahrzyklus ermittelt. Im Modell werden die Verbraucher so implementiert, dass die dem Fahrzyklus entsprechende Leistung als zusätzliche Verlustleistung zur benötigten Leistung des Elektromotors addiert wird. Hierbei wird bei Änderung des

ausgewählten Fahrzyklus durch den Anwender automatisch die Verlustleistung des entsprechenden Fahrzyklus ausgewählt.

ii. Licht und Komfortfunktionen

Die Fahrzeugscheinwerfer werden über das Parameterfile aktiviert. Das Modell der Fahrzeugklimatisierung wird ebenfalls über das Parameterfile angesteuert und enthält verschiedene Modelle zur Innenraumkonditionierung. Analog zur Brennstoffzellenperipherie werden Scheinwerfer und Fahrzeugklimatisierung als Verlustleistung im elektrischen System berücksichtigt.

f) Energiequellen (Hybrid Energy Source)

Das Hybrid-Energy-Source-Modul gliedert sich in zwei Bestandteile: das Brennstoffzellenmodell und das Modell der Hochvoltbatterie. Die Modellierung der Brennstoffzelle erfolgt anhand der Messdaten des Versuchsfahrzeugs. Für die Simulation des Hochvoltspeichers wurde ein am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik bestehendes Batteriemodell implementiert.

i. Brennstoffzellensystem

Viele Modelle benötigen zur Berechnung exakte Parameter des Brennstoffzellensystems. In diesen Modellen wird für die Simulation der Luftversorgung außerdem ein Verdichterkennfeld benötigt, über das in Abhängigkeit von Drehzahl und Druckdifferenz ein Massenstrom ermittelt wird. Die Umsetzung eines Verdichtersmodells aufgrund unzureichender Auflösung der Messtechnik war nicht möglich. Zudem gibt es nicht die Möglichkeit, auf demontierte Komponenten des Brennstoffzellensystems zuzugreifen, um geometrische Parameter zu erhalten. Da aus diesen Gründen keine Simulation der Druckverhältnisse erfolgen kann, wurde ein reduziertes Brennstoffzellenmodell ohne Modellierung des Kathoden- und Anodensystems erstellt, welches im Folgenden vorgestellt wird.

Im Brennstoffzellenmodell des Längsdynamikmodells wird die Dynamik der Brennstoffzelle berücksichtigt. Abbildung 19 zeigt das Verhalten der Brennstoffzelle und des Hochvoltspeichers des Versuchsfahrzeugs bei einem Lastsprung von 0% auf 100% des Fahrpedalsignalwerts. Es ist zu erkennen, dass der Hochvoltspeicher seine Maximalleistung liefert, bis die Brennstoffzelle einen bestimmten Leistungswert erreicht hat. Bei positivem Leistungsgradienten weist diese eine Verzögerungszeit von ca. 2,5 s auf, bis der Hochvoltspeicher nicht mehr seine Maximalleistung aufweist. Bei negativem Leistungsgradient fällt der steile Verlauf auf, der ab einem bestimmten Wert in einen konstanten „kriechenden“ Verlauf übergeht. Dieser dauert beim Lastsprung von 0% Fahrpedalstellung auf 100% ca. 10 s, ehe die Brennstoffzellenleistung entsprechend dem Verhalten eines PT1-Gliedes weiter abfällt.

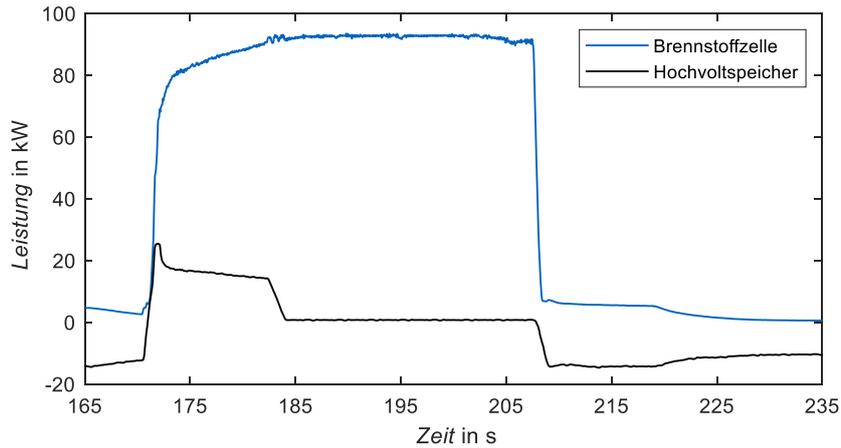


Abbildung 19: Leistungsverlauf von Brennstoffzelle und Hochvoltspeicher beim Lastsprung

Die Dynamik der Brennstoffzelle hängt vom Lastzustand und der geforderten Leistung ab. So weist diese, falls bereits eine Teillast anliegt, eine höhere Dynamik auf, als bei einem Lastsprung, dessen Anfangswert im Bereich der Leerlaufleistung der Brennstoffzelle entspricht. Die Dynamik der Brennstoffzelle wird im Modell über ein PT2-Glied mit fester Verzögerungszeit bei positivem und negativem Leistungsgradienten abgebildet. Zusätzlich wird der „kriechende“ Leistungsverlauf mit einem anschließenden weiteren Absinken bei negativem Leistungsgradienten unterhalb eines bestimmten Werts abgebildet. Dies erfolgt über ein PT1-Glied, welches eine gesonderte Verzögerungszeit besitzt. Ein Switch schaltet vom PT2-Glied auf das PT1-Glied, wenn die Brennstoffzelle bei negativem Leistungsgradienten einen bestimmten Wert unterschreitet.

Um die Brennstoffzelle im Simulationsmodell abzubilden, werden Kennlinien erstellt, die dem realen Verlauf hinreichend entsprechen sollen. Hierzu gehört die Strom-Spannungskennlinie. Diese weist in der realen Brennstoffzelle aufgrund verschiedener Einflussfaktoren wie der Temperatur und des Kathoden- bzw. des Anodendrucks unter verschiedenen Randbedingungen unterschiedliche Verläufe auf. Im Modell wird angenommen, dass für alle Randbedingungen eine Kennlinie gültig ist. Dies führt zu der Vereinfachung, dass druck- und temperaturabhängige Koeffizienten als konstant angenommen werden. Die Kennlinie wird in Matlab über eine nichtlineare Regression angenähert. Für die Erstellung der Kennlinie wurden alle Kennfeldversuche der Messdatenbank berücksichtigt. Hierfür wird analog zur Erstellung der Wirkungsgradkennlinie das Curve Fitting Tool mit der Funktion Custom Equation verwendet. Die Parameter der ermittelten Kennlinie sind in Tabelle 12 festgehalten.

$$U_{BZ} = 386.3286 - (c_1 + c_2(1 - \exp(-c_3 I_{BZ}))) - c_4 I_{BZ} - (I_{BZ}(c_5 I_{BZ})^{c_6}) \quad (II.8)$$

Tabelle 12: Parameter der Spannungsfunktion der Brennstoffzelle

Koeffizient	Wert	Einheit
c1	6,381	V
c2	36,93	V

c3	0,05139	1/A
c4	0,2207	V/A
c5	0,002066	(V/A ²) (1/c4)
c6	14,14	-

Der aus Gleichung (II.8) resultierende Spannungsverlauf der Brennstoffzelle ist in Abbildung 20, die den für die Brennstoffzelle charakteristischen Verlauf zeigt, dargestellt. Die Qualität der angenäherten Kurve lässt sich mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,987 und einem RMSE von 3,972 V bewerten.

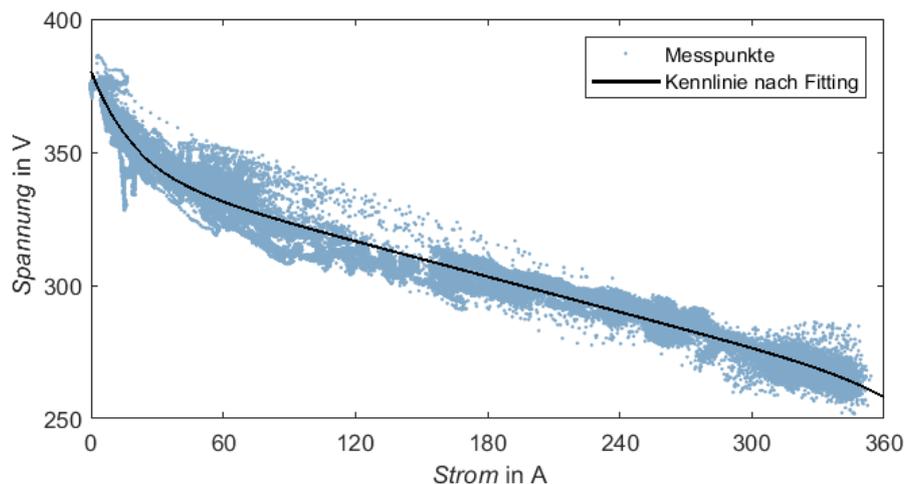


Abbildung 20: Strom-Spannungs-Kennlinie der Brennstoffzelle

Im Modell liegt als Eingangsgröße die Leistungsanforderung an die Brennstoffzelle vor, welche von der Betriebsstrategie vorgegeben wird. Diese Leistungsanforderung wird im Modell in einen Strom umgerechnet. Dies erfolgt über eine Strom-Leistungskennlinie, welche auf der berechneten Spannungs-Strom-Kennlinie basiert und als Look-up-Table hinterlegt ist. Nach der Umrechnung der geforderten Brennstoffzellenleistung in die entsprechende Stromgröße wird im Brennstoffzellenmodell anhand von Gleichung (II.9) der Verbrauch berechnet.

$$\frac{dm_{\text{H}_2, \text{verbr}}}{dt} = M_{\text{H}_2} \frac{nI_{\text{St}}}{2F} \varepsilon_{\text{BZ, H}_2} \quad (\text{II.9})$$

Der Faktor $\varepsilon_{\text{BZ, H}_2}$ berücksichtigt hierbei, dass im Brennstoffzellensystem durch Verluste wie über das Purge-Ventil mehr Wasserstoff verbraucht wird, als für die Reaktion benötigt wird. Als Eingangsgröße dient der gemessene Brennstoffzellenleistungsverlauf im entsprechenden Fahrzyklus, der über die Strom-Leistungskennlinie in den Brennstoffzellenstrom umgerechnet wird. Aufgrund der fehlerhaften Funktion der Tanktemperatursensoren im Bereich unter $-40\text{ }^\circ\text{C}$ werden entsprechende Versuche bei der Berechnung ausgeschlossen. Die berücksichtigten Versuchsnummern sind in Tabelle 13 dokumentiert. Die jeweiligen ermittelten Werte für gemessenen und berechneten Verbrauch sind mit den entsprechenden Standardabweichungen (STD) in Tabelle 13 hinterlegt. Es ist zu erkennen, dass sich

die Abweichungen zwischen $m_{H_2, Mess}$ und $m_{H_2, ideal}$ unter den Fahrzyklen deutlich unterscheiden können.

Tabelle 13: Ermittlung des Wasserstoffumsetzungsfaktors

Fahrzyklus (Versuchsnr.)	$m_{H_2, Mess}$ (STD)	$m_{H_2, ideal}$ (STD)	ε_{BZ, H_2} (STD)
WLTP (HVF4002-4004)	0,25 kg (4,79 %)	0,23 kg (0,31%)	1,10 (6,19%)
FTP-75 (HVF4012-4014)	0,16 kg (6,38 %)	0,14 kg (0,45%)	1,15 (6,83%)
NEFZ (HVF4024-4025)	0,12 kg (5,89 %)	0,10 kg (0,17%)	1,12 (7,45%)
CADC (HVF4037)	0,74 kg (-)	0,66 kg (-)	1,12 (-)
Kreibich (HVF4034-4036)	0,16 kg (0,08%)	0,14 kg (0,12 %)	1,20 (1,71%)

In Abbildung 21 ist der Aufbau des Brennstoffzellenmodells, der im Folgenden kurz zusammengefasst wird, dargestellt. Aus der geforderten Brennstoffzellenleistung $P_{BZ, gef}$ wird über die Verzögerungsglieder in Abhängigkeit des Vorzeichens des Leistungsgradienten die verfügbare Brennstoffzellenleistung $P_{BZ, verf}$ ermittelt. Die verfügbare Brennstoffzellenleistung wird über die Strom-Leistungs-Kennlinie in den Brennstoffzellenstrom I_{BZ} umgerechnet. Anhand der Gleichung (II.9) wird der Wasserstoffverbrauch berechnet. Durch die Berücksichtigung des Wasserstoffumsetzungsfaktors kann ein direkter Vergleich der Brennstoffzelleneffizienz von Simulation und Realfahrzeug erfolgen.

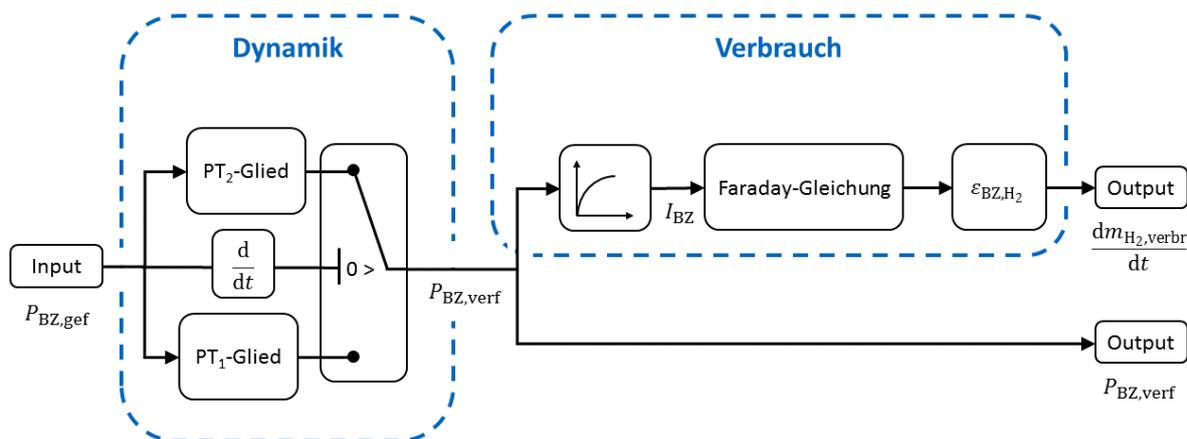


Abbildung 21: Vereinfachte Darstellung des Brennstoffzellenmodells

ii. Hochvoltpeicher

Aufgrund fehlender detaillierter Informationen und Messwerte der Hochvoltbatterie auf Zellebene wurde ein Batteriemodell HV Pack 2RC aus der Komponentenbibliothek ausgewählt. Das im Batteriemodell integrierte Zellmodell ist wiederum aus einem Ersatzschaltkreis nach Abbildung 22 aufgebaut. Im Modell wird aus der geforderten

Batterieleistung eine Stromanforderung ermittelt, die als Eingangsgröße ins Zellmodell dient. Über die Kapazitäten und Widerstände des Zellmodells, die als Funktion des SOC in Look-up-Tables hinterlegt sind, wird die verfügbare Spannung des Hochvoltspeichers ermittelt. Die Beschreibung eines RC-Gliedes im Zellmodell lässt sich entsprechend der Gleichung (II.10) Differentialform darstellen.

$$\frac{dU}{dt} = \frac{I}{C} - \frac{U}{RC} \quad (\text{II.10})$$

Im Zellmodell wird die Gesamtspannung als Summe der Einzelspannungen (OCV , U_0 , U_1 , und U_2) berechnet. Die Spannungen der RC-Glieder werden aus der gelösten Differentialgleichung über die Gleichung (II.11) ermittelt.

$$U = RI \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (\text{II.11})$$

Die Zeit t wird hierbei als Differenz aus der aktuellen Simulationszeit und der Simulationszeit aus dem vorherigen Zeitschritt berechnet. Da das Batteriemodell keine Ladefunktion vorsieht, wurde es dahingehend angepasst, dass eine einfache Kennlinie für den Lade- bzw. Entladewiderstand in Abhängigkeit des SOC implementiert wurde. Da die Betriebsstrategien mit diesem Batteriemodell entwickelt wurden, wurde die Kennlinie in dieser Form ins Längsdynamikmodell übernommen.

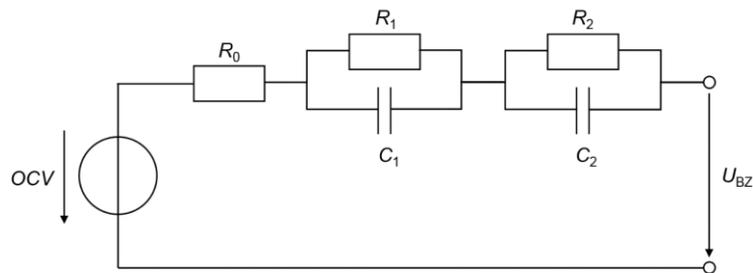


Abbildung 22: Ersatzschaltbild des Batteriezellmodells

g) Antriebsstrang (Drivetrain)

Im Modell des Antriebsstrangs werden die elektrische Traktionsmaschine, das Getriebe und die Antriebs- bzw. die Bremskräfte am Rad simuliert. Hierfür stehen in der Komponentenbibliothek verschiedene Modelle zur Verfügung.

Da der Wirkungsgrad des Elektromotors messtechnisch erfasst wurde, wird das Motormodell Electric Drive Calculation with Power Loss Map implementiert, das über ein Kennfeld aus der Motorleistung die entsprechenden Verlustleistungen berechnet. Die Daten des Motors werden über die Modellmaske eingegeben. Zu den Werten gehören die Masse bzw. das Massenträgheitsmoment des Elektromotors, Vektoren für eine Vollastkennlinie (Motormoment und Drehzahl) und ein Verlustkennfeld der Traktionsmaschine in Form einer Matrix (Verlustleistung, Moment, Drehzahl). Als Eingangsgrößen in das Modell dienen die verfügbare Batterieleistung, die Brennstoffzellenleistung, die Motordrehzahl und die Drehmomentanforderung. Zunächst wird aus der Brennstoffzellen- und der verfügbaren Hochvoltbatterieleistung

das verfügbare Motordrehmoment berechnet. Nach einem Abgleich des Moments mit der Drehmomentanforderung wird der niedrigere Wert im Signalverlauf weitergegeben. Analog erfolgt der Vergleich des weitergegebenen Signals mit dem maximalen Drehmoment, welches mit der aktuellen Drehzahl aus dem Vollastkennfeld ausgelesen wird. Im anschließenden Submodell wird zu der benötigten mechanischen Leistung die aus einem Kennfeld ausgelesene Verlustleistung addiert.

Da das Modell der Komponentenbibliothek für den Rekuperationsbetrieb bisher den Betrag des geforderten Bremsmoments weitgehend vernachlässigt hat, wird es dahingehend angepasst, dass stets das geforderte Bremsmoment in das Rekuperationsmoment des Elektromotors umgerechnet wird. Im Modell wird zusätzlich zum geforderten Bremsmoment das Masse-trägheitsmoment des Traktionsmotors berücksichtigt. Analog zum Zugbetrieb des Motors werden auch im Rekuperationsbetrieb die Motorenverluste berücksichtigt. Das Verlustleistungskennfeld ist in Abbildung 23 dargestellt.

Die verfügbare Brennstoffzellenleistung entspricht im Motormodell stets dem Maximalwert von 100 kW, um zu gewährleisten, dass zu jedem Zeitpunkt die notwendige Leistung für die Bereitstellung des benötigten Drehmoments verfügbar ist. Diese Annahme ist notwendig, da sich die geforderte bzw. die verfügbare Brennstoffzellenleistung auf den vorherigen Zeitschritt bezieht. Im Konzept A entspricht die verfügbare Brennstoffzellenleistung dem aktuellen Zeitschritt und dient als Eingangsgröße in das Motormodell. In Simulationsdurchläufen mit Konzept A zeigt sich, dass das Fahrzeug dem vorgegebenen Geschwindigkeitsverlauf stets folgen kann und somit jederzeit das benötigte Motordrehmoment zur Verfügung steht. Die Annahme für Konzept B ist somit gerechtfertigt.

In das Modell wurde ein einfaches Getriebemodell integriert, das einen festen Wirkungsgrad und die Gesamtübersetzung aller Getriebestufen des Fahrzeugs berücksichtigt. Eine weitere Eingangsgröße ist die Raddrehzahl, welche zuvor im Submodell Dynamics ermittelt wurde.

Im Modul Drivetrain erfolgt zudem die Berechnung der am Rad auftretenden Kräfte, aus der die Vortriebskraft bzw. die Verzögerungskraft am Rad ermittelt werden. Hierbei wird die Fahrzeugdynamik hinsichtlich dynamischer Achslastverteilung berücksichtigt. Zusätzlich wird geprüft, ob durch das aktuelle Moment die maximal vom Reifen auf die Fahrbahn übertragbare Kraft überschritten und gegebenenfalls begrenzt wird.

Das zusätzlich zur Rekuperation benötigte Bremsmoment werden aus der Differenz zwischen relativer Bremskraft und dem Moment an den Achsen berechnet. Eingangsparameter sind die Bremsmomente an den Achsen, das Motormoment und die Fahrzeuggeschwindigkeit.

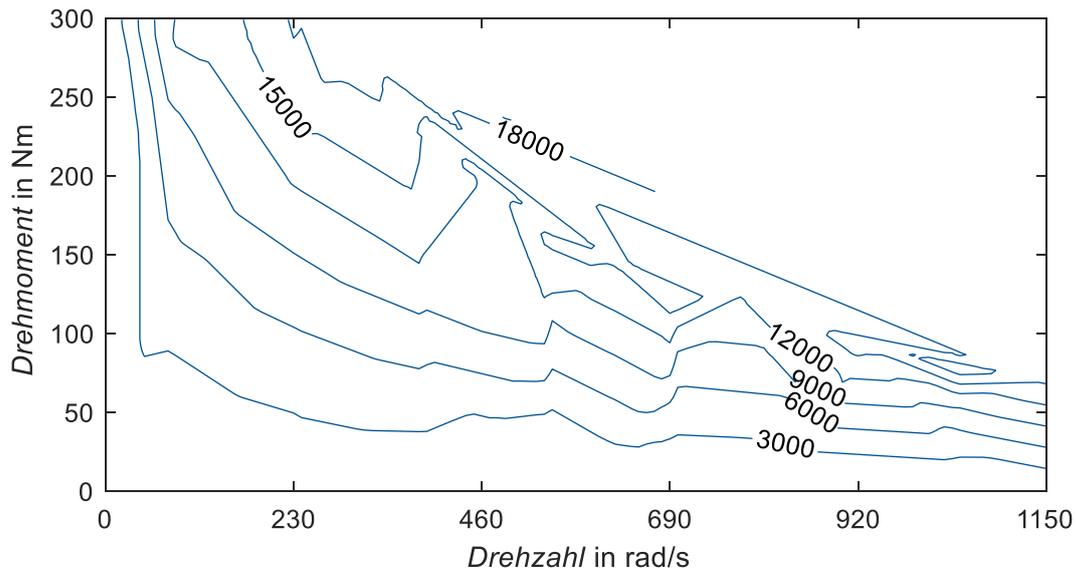


Abbildung 23: Leistungsverluste des Elektromotors in W

h) Fahrzeugdynamik (Dynamics)

In diesem Submodell werden sämtliche Fahrwiderstände berechnet. Diese werden von der Vortriebskraft am Rad des Fahrzeugs subtrahiert. Aus der resultierenden Kraft wird über das zweite Newtonsche Gesetz die Beschleunigung und durch deren Integration die Fahrzeuggeschwindigkeit ermittelt. Der Gesamtfahrwiderstand setzt sich aus dem Luftwiderstand, dem Rollwiderstand, dem Steigungswiderstand und dem Beschleunigungswiderstand zusammen. Der Luftwiderstand wird anhand der Gleichung (II.12) über die Fahrzeugquerschnittsfläche A_{Fzg} in x-Richtung, die Luftdichte ρ_{Luft} , den c_w -Wert und die Geschwindigkeit v des Fahrzeugs berechnet.

$$F_{Luft} = \frac{1}{2} \rho_{Luft} A_{Fzg} c_w v^2 \quad (II.12)$$

Der Rollwiderstand wird nach Gleichung (II.13) aus der Fahrzeugmasse m_{Fzg} dem Rollwiderstandsbeiwert c_{RR} und dem Steigungswinkel α ermittelt, der ebenfalls für die Berechnung des Steigungswiderstands anhand von Gleichung (II.14) herangezogen wird.

$$F_{Roll} = m_{Fzg} g c_{RR} \cos \alpha \quad (II.13)$$

$$F_{Steig} = m_{Fzg} g \sin \alpha \quad (II.14)$$

Aus der Fahrzeugmasse, der Fahrzeugbeschleunigung a und dem Drehmassenzuschlagsfaktor für rotierende Massen λ wird der Beschleunigungswiderstand mit Gleichung (II.15) berechnet.

$$F_{Beschl} = m_{Fzg} a \lambda \quad (II.15)$$

3) AP 1.3: Technologievergleich FCEV/BEV/ICEV (TUM)

Die vorhergehenden Abschnitte beschreiben die Versuchsplanung und -Durchführung sowie die Modellierung und Simulation eines FCEV-Realfahrzeugs, das im Rahmen des Projekts im Carsharing eingesetzt wurde. Die bereits genannte Veröffentlichung [10], die im Rahmen einer internationalen Fachtagung vorgestellt wurde, beinhaltet den Vergleich des Hyundai ix35 FC mit dem batterieelektrischen Fahrzeug (engl.: Battery Electric Vehicle, kurz: BEV) VW eGolf anhand einer festgelegten Rundstrecke („Kreibich-Runde“, siehe II.1.1).b).(6)).

Es konnte experimentell gezeigt werden, dass die elektrische Energie, die von der Antriebsmaschine aufgenommen wird, beim FCEV um etwa 8,36% höher liegt (FCEV: 3,76 kWh; BEV: 3,47 kWh). Der Mehrverbrauch des FCEV erscheint auf Basis der höheren Fahrwiderstände (Fahrzeuggewicht, c_w -Wert, Stirnfläche) plausibel und ist somit auf die grundlegende Konzeption des Hyundai ix35 FC zurückzuführen. Es muss jedoch beachtet werden, dass das gemessene Delta unter nicht exakt gleichen Einsatzbedingungen erhoben werden konnte, weil es sich beim Rundkurs um öffentliche Straßen handelt. Somit beeinflussen Faktoren wie Verkehrseinfluss, Geschwindigkeitsbeschränkungen, Baustellen sowie der spezifische Fahrstil des Fahrers die Versuchsdurchführung. In Summe fiel der Fahrstil bei den FCEV-Versuchen verbrauchssparender aus, was durch die im Schnitt 5,5 min längeren Rundenzeiten und damit verringerten Durchschnittsgeschwindigkeiten über dem Rundkurs gezeigt werden kann. Unter exakt gleichen Einsatzbedingungen der beiden Fahrzeuge würde das diskutierte Delta also noch größer ausfallen, als es in den vorliegenden Messungen gezeigt werden konnte.

Bei den beschriebenen Verbrauchswerten handelt es sich um die summierte Energieaufnahme der elektrischen Antriebsmaschine während der Versuchsfahrten. Zur Bewertung von Gesamtfahrzeugen hinsichtlich der Betriebskosten ist jedoch ein Vergleich der Primärenergieverbräuche erforderlich. Im Falle des FCEV liegt die Primärenergie in Form von Wasserstoff vor, welcher mithilfe der Brennstoffzelle in elektrische Energie gewandelt wird, die für den Antrieb des Fahrzeugs benötigt wird. Bei BEV ist die Primärenergie bereits als elektrische Energie in Hochvolt-Akkumulatoren gespeichert.

Um also einen Vergleich zwischen dem Primärenergiebedarf von BEV und FCEV zu gewährleisten, ist zunächst eine Errechnung des Energiegehalts des Wasserstoffs erforderlich. Hierfür wird der Heizwert von Wasserstoff (33,3 kWh/kgH₂) herangezogen und mithilfe des in [10] präsentierten H₂-Verbrauchs ein Primärenergieverbrauch von 6,01 kWh für den beschriebenen Fahrzyklus errechnet.

Unter der Annahme, dass zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes langfristig der Anteil an regenerativer Energieerzeugung ansteigt, wird zukünftig zunehmend mehr elektrische Primärenergie zur Verfügung stehen. Infolgedessen unterliegt die Erzeugung des für den Betrieb von FCEV erforderlichen Wasserstoffs aus elektrischer Energie einer Wirkungsgradkette, die den elektrischen Primärenergiebedarf durch die Wandlung von elektrischer Energie zu Wasserstoff vergrößert.

Zusammenfassend kann von einem 1,5- bis 2,5-fachen elektrischen Primärenergiebedarf von FCEV gegenüber BEV ausgegangen werden, was BEV im Hinblick auf die Betriebskosten einen wirtschaftlichen Vorteil verschafft. Dem gegenüber stehen die derzeitigen Limitationen von Reichweite und Ladedauer bei BEV, welche nur einen begrenzten Langstrecken- und Dauereinsatz der Fahrzeuge ermöglichen. Die zu wählende Antriebstopologie ist aus den genannten Gründen für einen spezifischen Einsatzzweck jeweils individuell zu wählen und es kann keine generalisierte Handlungsempfehlung ausgesprochen werden.

4) AP 1.4: Optimierung der Fahrzeugeigenschaften für den Flotteneinsatz (TUM)

Aus den in den vorherigen Abschnitten gezeigten Untersuchungen lassen sich Optimierungspotentiale für die Fahrzeugeigenschaften für den Flotteneinsatz ableiten. Zum einen sollten aufgrund des hohen Primärenergiebedarfs von FCEV die Wirkungsgrade des Brennstoffzellensystems verbessert werden, indem beispielsweise Spülverluste reduziert oder die Betriebsstrategie verbrauchsoptimal ausgelegt wird. FCEV sind in der Lage, mithilfe des Hochvoltspeichers gezielt den Lastpunkt der Brennstoffzelle auf ihren optimalen Punkt zu verschieben. Dies sollte bei zukünftigen Fahrzeugen umgesetzt werden, sowie von der zukünftigen Route abgeleitete energieoptimale Betriebsstrategien.

Weiterhin sollten zukünftige Brennstoffzellenfahrzeug sogenannte „Purpose-Entwicklungen“ sein. Das heißt, dass das gesamte Fahrzeugkonzept für den Brennstoffzellenantrieb ausgelegt wurde. Beim Hyundai ix35 FC handelt es sich um ein sogenanntes „Conversion-Car“, das ursprünglich mit Verbrennungsmotoren entwickelt und anschließend für den Brennstoffzellenantrieb angepasst wurde. Die Vorteile von Purpose-Entwicklungen schlagen sich vor allem im Package (der Komponentenplatzierung) nieder, sodass Fahrzeuge kleiner und leichter und somit verbrauchsärmer ausgelegt werden können.

Im vorliegenden Forschungsprojekt kam lediglich ein Fahrzeugtyp zum Einsatz, was im Hinblick auf unterschiedliche Kundenwünsche und -anforderungen nachteilig sein kann. Möchte ein Kunde beispielsweise das Fahrzeug nur innerhalb der Stadt verwenden, ohne das große Ladevolumen zu nutzen, wäre ein kleineres, leichteres Fahrzeug dafür besser geeignet. Ebenso könnten Fahrzeuge mit größerem Ladevolumen und höherer Nutzlast für Kundenanwendungen wie Umzüge oder Möbeltransport sinnvoll sein. Es ist zukünftig also eine Differenzierung der Fahrzeugkonzepte am Markt anzustreben, sodass Flotten flexibel zusammengesetzt werden können.

Eine Weiterentwicklung, deren Potential vor allem am Hyundai ix35 FC aufgefallen ist, stellt die Verbesserung der Verbrauchsprädiktion dar. Gerade auf dem Hintergrund eines noch ungenügend ausgebauten Tankstellennetzwerks und Problemen mit der Tankstellenverfügbarkeit ist die exakte Reichweitenprädiktion die elementare Funktionalität, die es dem Kunden erlaubt, seine Routen – unter Berücksichtigung möglicher Risiken – zu planen. Eine überproportional schnelle Abnahme der Reichweite auf Landstraßen und Autobahnen verunsichert die Fahrer und schmälert das Vertrauen in die Technologie.

AP2: Forschungsvorhaben H₂-Infrastruktur

1) AP 2.1: Erforschung Tankstellenlage / HRS-Standort

Verteilung der Tankvorgänge nach Standort

In diesem Arbeitsschritt wurde die Verteilung der durchgeführten Betankungen im Münchner Raum untersucht. Dabei wurden alle Betankungen in Deutschland zwischen dem 01.04.2016 und dem 31.03.2018 als Datengrundlage genutzt.

Die Untersuchungen zeigen auf, dass die Tankstelle München Detmoldstraße in dem analysierten Zeitraum am häufigsten für Betankungen verwendet wurde, da sie auch eine Zeit lang die einzig verfügbare Tankstelle im Münchner Raum war.

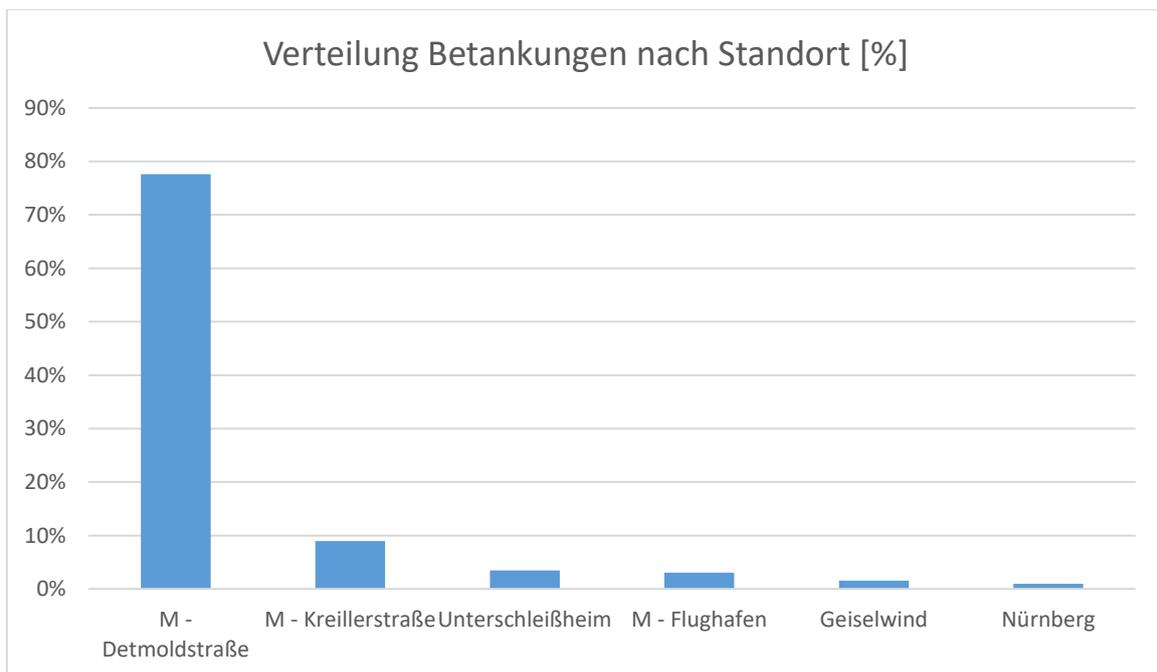


Abbildung 24: Verteilung der durchgeführten Betankungen nach Standort (Daten 01.04.2016 – 31.03.2018)

Änderung der Tankstellenwahl über die Zeit

In diesem Arbeitsschritt wurde die Verteilung der durchgeführten Betankungen nach Standorten durchgeführt.

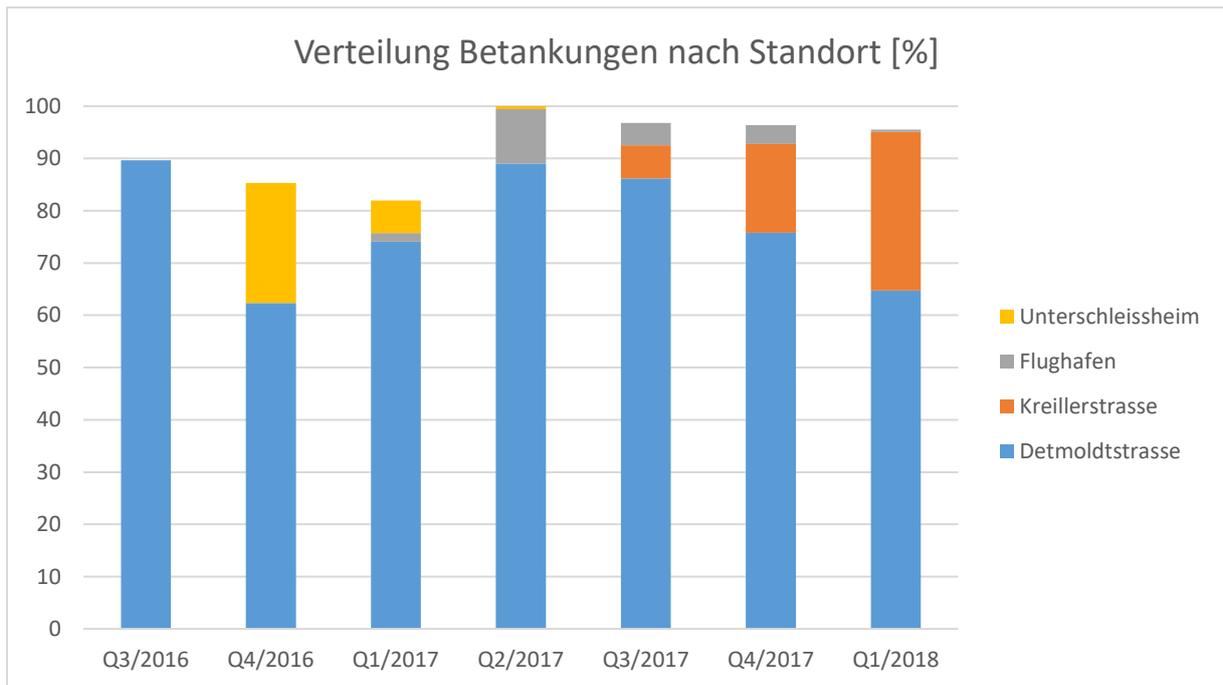


Abbildung 25: Verteilungskurve Betankung nach Standorten (Daten Q3/2016 – Q1/2018)

Nach der Eröffnung und der Inbetriebnahme der Tankstelle Kreillerstraße im Q3/ 2017, die auch nah an BeeZero-Homezones lag, hat ihre Nutzung mit der Zeit sichtlich zugenommen.

Erforschung Tankstellenlagen

Der Zusammenhang zwischen der Distanz zwischen den genutzten Tankstellen im Münchner Raum und den Adressen der BeeZero Kunden wurden im Hinblick auf die Durchführung der Betankungen durch die Kunden analysiert.

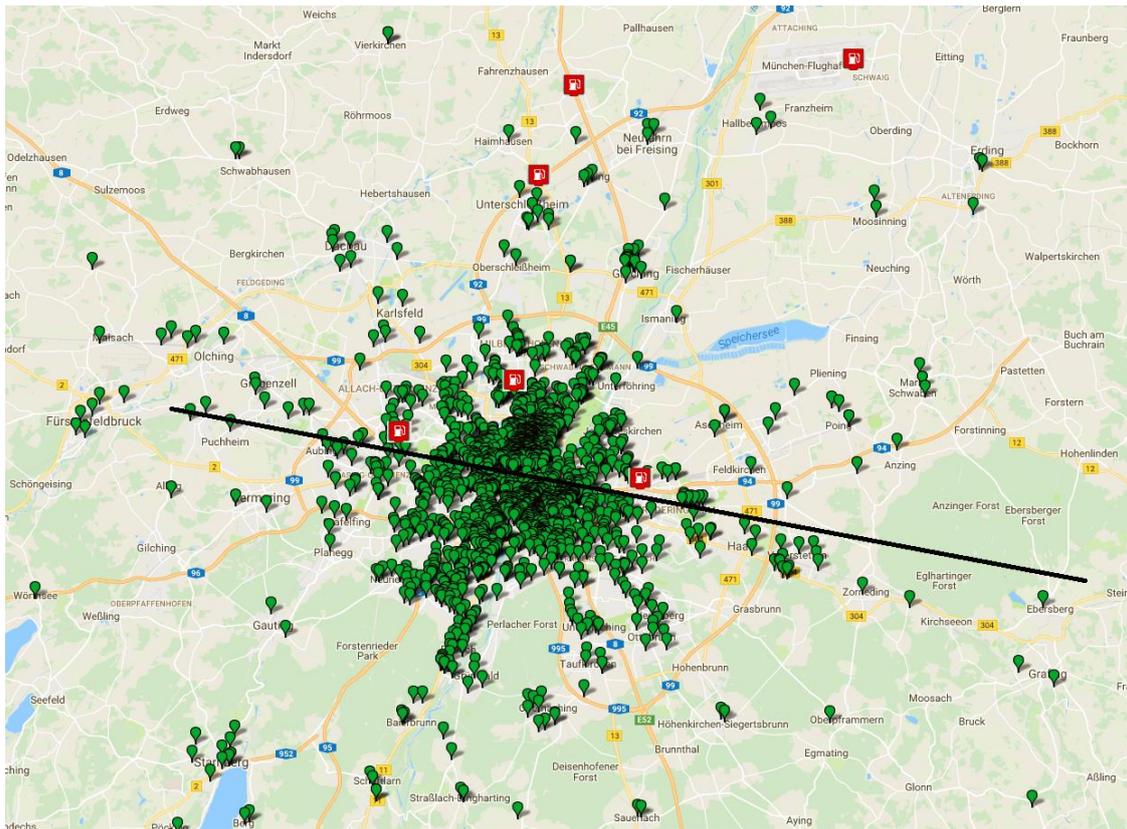


Abbildung 26: Kundenadressen und Lage der H2-Tankstellen einschließlich Q1/2018 (rot: Wasserstofftankstellen; grün: Adressen der BeeZero-Kunden)

Die obige Abbildung (Stand Q1/2018) zeigt auf, dass nur die Kunden mit Wohnsitz im Münchner Norden (alles oberhalb der schwarzen Linie), über Tankstellen in Ihrer Umgebung verfügten. Damit auch Kunden, die im Süden wohnen, nicht zu lange Strecken zur Tankstelle zurücklegen müssen, ist ein Ausbau des Tankstellennetzes im Münchner Süden essenziell. Diesem Bedarf wurde bereits nachgekommen, siehe Abbildung 27. Kunden im Münchner Süden können auf die Tankstelle in der Ottobrunner Str. ausweichen.



Abbildung 27: Aktuell verfügbare H2-Tankstellen in München und näherer Umgebung (Stand Juni 2019)

2) AP 2.2: Erforschung Nutzungsdaten HRS – Tankstellenkomponenten

Gefahrenere Distanzen zwischen Betankungen

Durch eine Untersuchung der Betankungsdaten und -rechnungen inklusive der Veränderung der Tankstände, konnte eine Analyse der Daten ab Start des Motors mit Information über Tanklevel und gefahrene Kilometer für den Zeitraum Juni 2017 – März 2018 durchgeführt werden. Wie der Abbildung 28 entnommen werden kann, wurden 70,3 % der durchgeführten Fahrten mit einer Einzelbetankung durchgeführt.

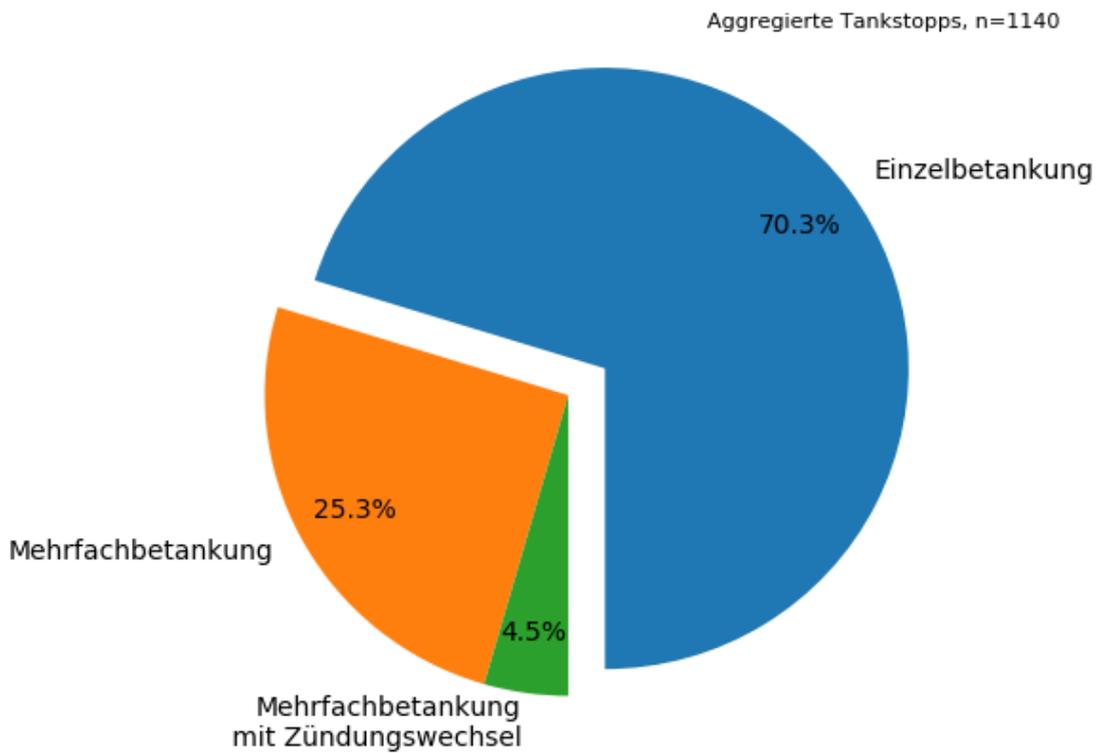


Abbildung 28: Auswertung der Betankungsdaten

Mehrfachbetankungen waren notwendig, um das Auto vollzutanken, was auf mögliche Probleme hindeutet.

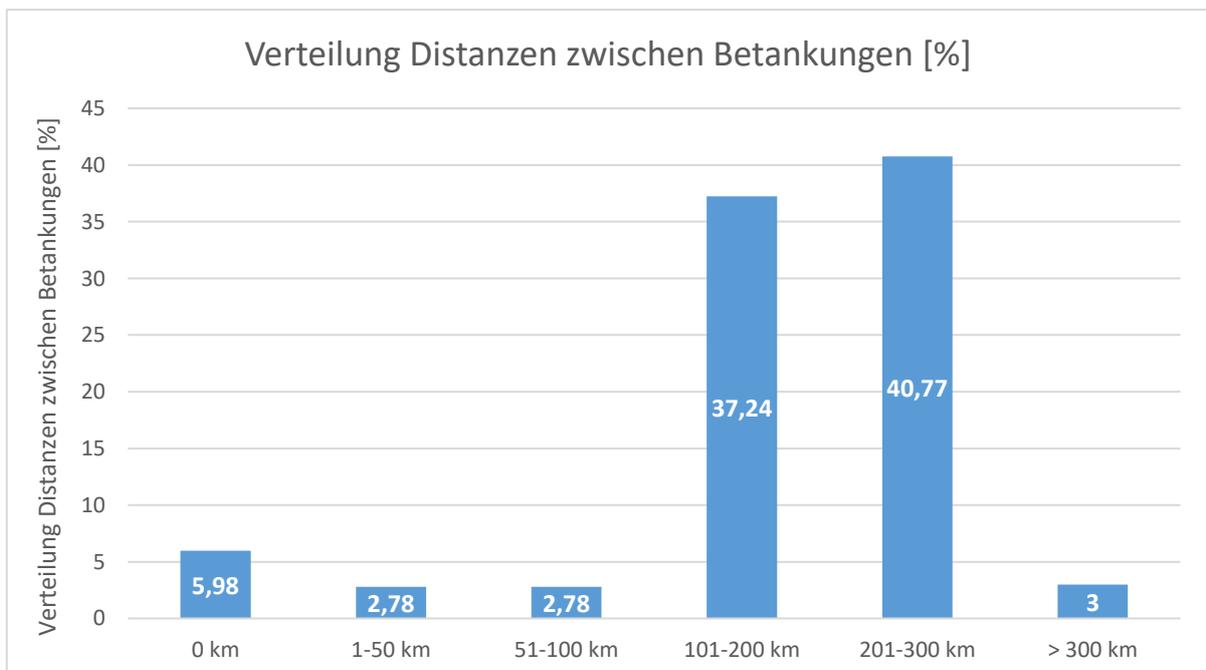


Abbildung 29: Verteilung der Distanzen zwischen den Betankungen

Im Rahmen des Fahrzeugeinsatzes für das Carsharing wurde der Versuch unternommen, die Fahrzeuge ab einem Tankinhalt von ca. 50% systematisch zu betanken. Dazu und durch die an den Kunden kommunizierte Reichweite (ca. 400km) wurden nur wenige Fahrzeuge über 300 km zwischen zwei Betankungen gefahren.

Einige Betankungen haben fehlgeschlagen und wurden erst nach ein paar Versuchen erfolgreich durchgeführt, deswegen sind einige Daten als „0 km“ zusammengefasst.

3) AP 2.3: Erforschung Nutzungsdaten HRS – Wasserstoffabgabe

In diesem Arbeitspaket wurde die Betankungsstrategie der Kunden untersucht.

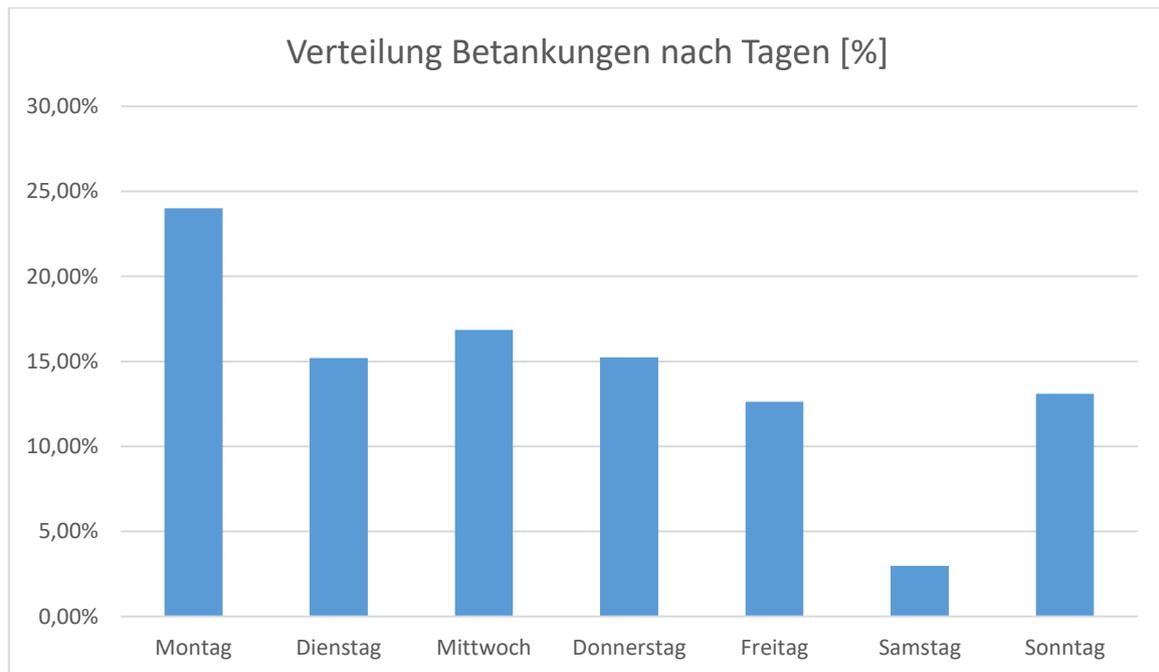


Abbildung 30: Verteilung Betankungen nach Wochentagen (Daten 01.04.2016 – 31.03.2018)

Durch die vergleichsweise hohe Anzahl an Anmietungen von Wasserstofffahrzeugen am Wochenende, wurden die Autos folglich zumeist kurz vor Rückgabe der Fahrzeuge betankt, also meistens am Anfang der Woche (Montag). Ansonsten lässt sich eine homogene Verteilung der Betankungen bezogen auf die Woche feststellen. Auch am Sonntag wurden Betankungen unternommen, die geringste Anzahl konnte am Samstag festgestellt werden.

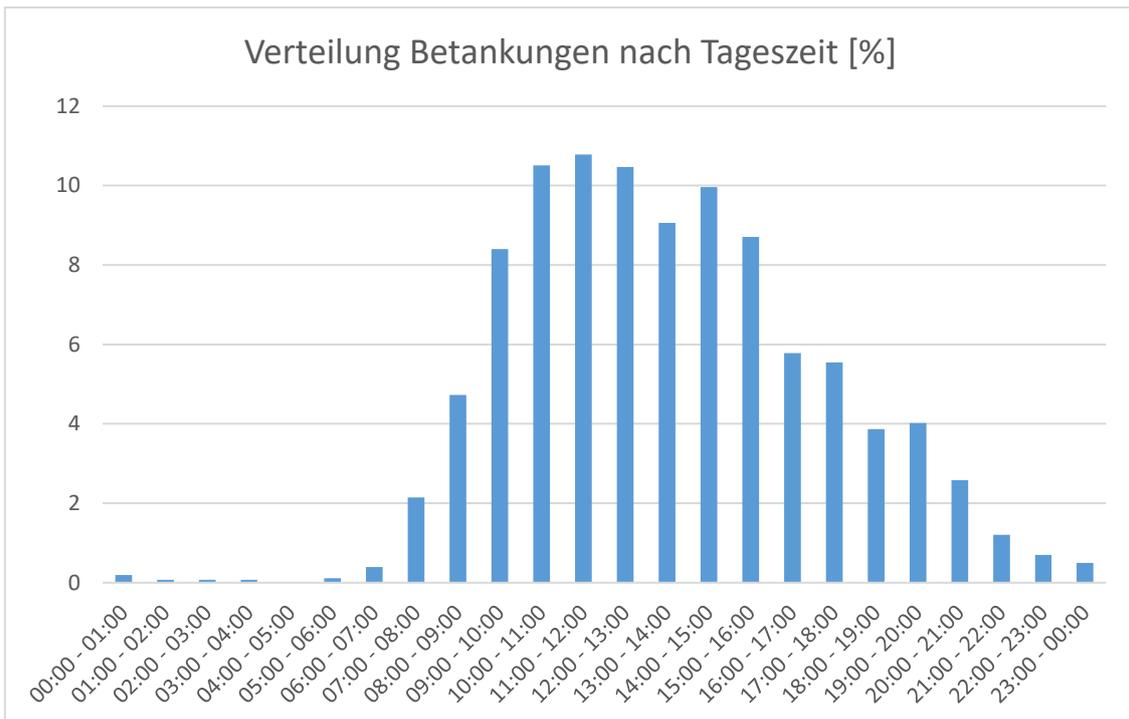


Abbildung 31: Verteilung der Betankungen nach Tageszeit (Daten 01.04.2016 – 31.03.2018)

Die meisten Betankungen wurden hierbei im Zeitraum 08:00 – 20:00 durchgeführt, was einen Einfluss auf die Verfügbarkeit der Fahrzeuge hatte. Die Nutzungsintensität ist dabei vor allem auf Mittag und Nachmittag fokussiert, zum Abend nahm die Anzahl der Betankungen deutlich ab.

Optimale Betankungszeiten seitens BeeZero Service Teams wären in der Nacht gewesen, was aber aus nachfolgenden Gründen schwer zu realisieren war:

- Teams für Nachtschichten waren zum Teil nicht verfügbar
- Höhere Kosten bei Nachtschichten
- Tankstellen waren zum Teil einige Stunden während der Nacht außer Betrieb (z.B. von 01:00 – 04:00), damit die Tankstelle sich vom Tag „runterkühlt“

4) AP 2.4: Erforschung Nutzungsdaten HRS – Zuverlässigkeit

In diesem Arbeitspaket wurde die Zuverlässigkeit der Tankstellen validiert. Hierbei wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Analyse der H2-Tankstellen (Verfügbarkeitsdaten)
- Abgleich von erfolgreichen und erfolglosen Tankversuchen
- Analyse der Tankstände

Die Verfügbarkeit der im Projekt genutzten Tankstellen hatte einen hohen Einfluss auf die operativen Ergebnisse des Carsharing-Konzeptes. Durch die geringe Anzahl an verfügbaren H2-Tankstellen in Bayern, insbesondere im Jahr 2017, konnten die Fahrzeuge zum Teil bei geringer Verfügbarkeit der Tankstelle nicht ordnungsgemäß betankt und für die Kunden zur Verfügung stehen. Teilweise reichte die Reichweite auch nicht aus, um bis zu einer weiteren Tankstelle (z.B. München Flughafen) zu

fahren. Die Fahrzeuge standen teilweise bis zur erneuten Inbetriebnahme der defekten Tankstelle still.

5) AP 2.5: Auslegung eines optimalen Tankstellennetzwerks für den Großraum München (TUM)

a) Einführung in die Infrastrukturplanung und Stand der Wissenschaft

Der Auf- und Ausbau von H₂-Infrastruktur stellt eine grundlegende Voraussetzung für den Erfolg bei der Einführung von FCEV dar. Da sich die deutsche H₂-Infrastruktur derzeit noch im Aufbau befindet, steht vor allem die Positionierung von neuen Wasserstofftankstellen (engl. hydrogen refueling stations, HRS) zur Vergrößerung der räumlichen Abdeckung im Fokus der Betrachtungen.

Die modellbasierte Positionierung von Infrastrukturstandorten wurde international bereits in verschiedenen Veröffentlichungen behandelt und bisher vor allem für konventionelle Tankstellen (für ICEV) oder für die Positionierung von Ladesäulen (für BEV) angewandt. Grundsätzlich werden ortsbasierte und verkehrsflussbasierte Modelle unterschieden: Erstere basieren auf sogenannten „Standortfaktoren“ (wie beispielsweise Einwohnerzahlen, Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge oder Einkommensgrenzen) und maximieren bei der Standortauswahl die zu erwartende Nachfrage. Da gerade Verkehrsströme die Nachfrage für Infrastrukturstandorte beeinflussen, nutzen verkehrsflussbasierte Modelle real gemessene oder statistische Verkehrsdaten, um einen möglichst großen Anteil der vorbeiführenden Verkehrswege zu bedienen.

Im Rahmen des Projekts LHMC wurden verschiedene Auslegungsmethoden aus der Literatur als Ausgangsbasis verwendet, um darauf aufbauend einerseits ein Tankstellennetz für den Großraum München zu entwickeln und andererseits eine Infrastrukturplanung für Deutschland durchzuführen. Zunächst wird in diesem Bericht auf den Stand der Wissenschaft eingegangen und anschließend die Auslegungsmodelle und Ergebnisse aus der Projektbearbeitung dargestellt.

i. Das Flow-Capturing Location Model (FCLM) von Hodgson

Hodgson [11] präsentiert zunächst mit dem „Flow-Capturing Location Model“ (FCLM) ein Modell, das Fahrten als Quelle-Ziel-Beziehungen in Form einer sogenannten O-D-Matrix (Origin-Destination-Matrix) auf einem graphenbasierten Straßennetz routet, in welchem jeder Knoten einen potentiellen Infrastrukturstandort darstellt. Der Verkehrsfluss einer Kante (bspw. eines Straßenabschnitts) wird jeweils dem Zielknoten (bspw. der nächsten Kreuzung) zugeschrieben. Für einen Knoten werden somit alle Verkehrsbeziehungen, die diesen als Zielknoten haben, aufaddiert und damit die Gewichtung dieses Knotens bestimmt.

Das FCLM steht unter den Annahmen, dass ein Standort die gesamte Nachfrage des vorbeiführenden Verkehrsflusses bedienen kann und dass die Positionierung eines Standorts keine Rückwirkung auf die Verkehrsströme hat. Ferner kann es bei gleichzeitiger Auswahl mehrerer Knoten zur sogenannten „Kannibalisierung“ kommen, indem mehrere nahe beieinander gelegenen Knoten mit hohem Verkehrsaufkommen gewählt und somit gleiche Verkehrswege mehrfach berücksichtigt werden. Diesem Problem kann durch ein iteratives Vorgehen begegnet werden, indem Knoten schrittweise nach dem Kriterium des höchsten Verkehrsflusses ausgewählt und nach Auswahl eines Knotens die bereits abgedeckten Verkehrswege bei Neuberechnung

der Gewichtungen nicht mehr berücksichtigt werden. Der nächste Knoten wird folglich unter Berücksichtigung der bereits positionierten Standorte ausgewählt.

Das FCLM berücksichtigt ausschließlich Verkehrsflüsse und vernachlässigt dabei Fahrzeuge mit deren spezifischen Reichweiten und Verbräuchen. Folglich stellt die resultierende Infrastrukturauslegung nicht sicher, dass alle in der O-D-Matrix enthaltenen Fahrten auch durchführbar sind.

ii. Das Flow-Refueling Location Model (FRLM)

Im Flow-Refueling Location Model (FRLM) von Kuby und Lim [12] wird dem letztgenannten Kritikpunkt des FCLM begegnet: Das FRLM berücksichtigt die Reichweite von Fahrzeugen sowie deren Verbrauch. Vereinfachend wird ein konstanter Verbrauch pro Strecke angenommen, der für alle Fahrzeuge und Strecken gilt. Als weitere Vereinfachung wird eingeführt, dass alle Fahrzeuge die gleiche Tankgröße aufweisen, sodass alle Fahrzeuge die gleiche Reichweite aufweisen. Die Erweiterung um die Fahrzeugreichweite ermöglicht die Untersuchung und Berücksichtigung der Durchführbarkeit von Fahrten.

Das Vorgehen im FRLM beschreiben Kuby und Lim wie folgt: Es werden nacheinander alle Tracks der O-D-Matrix betrachtet und je Track mögliche Infrastrukturkombinationen unter Berücksichtigung der Fahrzeugreichweite generiert. Eine Infrastrukturkombination, die dazu führt, dass ein Fahrzeug an einem Knoten eine negative verbleibende Reichweite aufweist, wird als nicht durchführbar gewertet und aussortiert. Als entscheidende Anfangsbedingung beim Start jeder Fahrt wird der Tankstand auf voll gesetzt, sofern sich am Startpunkt eine Tankstelle befindet. Falls sich dort keine befindet, wird das Fahrzeug mit halb gefülltem Tank initialisiert. Dies ist der mindestens erforderliche Tankstand, der noch vorhanden sein muss, wenn ein Fahrzeug an der nächstgelegenen Tankstelle aufgetankt wurde, um vom Startpunkt wieder zurück zur Tankstelle zu gelangen. Schließlich wird die Infrastrukturkombination mit der geringsten Anzahl an Stationen ausgewählt.

Dieses Modell bildet die Realität durch Erweiterung um Fahrzeuge und deren Reichweiten besser ab als das FCLM. Allerdings bleiben Umwege bei der Nutzung von Infrastruktur unberücksichtigt. So könnte ein Fahrer bereit sein, von seiner kürzesten Route abzuweichen, um einen Tankvorgang durchzuführen.

Lim und Kuby [13] verbessern das FRLM in einer weiteren Veröffentlichung, indem sie als Lösungsansatz nicht mehr Mixed Integer Linear Programming (MILP) einsetzen, welches gerade für größere Netzwerke zu einer zu hohen Anzahl an Permutationen führt und somit zu hohen Rechenzeiten aufweist. Stattdessen setzen sie auf heuristische Algorithmen wie beispielsweise Vertex Substitution, greedy adding, und Genetische Algorithmen, welche alle durch ein Anfangsset von Infrastrukturstandorten initialisiert werden und dieses anschließend in einer definierten Anzahl von Iterationen optimieren.

Die Effizienz der genannten heuristischen Ansätze konnte von Tran et al. [14, p. 159] durch die Entwicklung eines neuen heuristischen Algorithmus erhöht werden, welcher für Lokalisierungsprobleme verwendet werden kann. Dieser zeigt eine deutlich

verbesserte Performance gegenüber den genannten heuristischen Algorithmen, wird jedoch für den vorliegenden Bericht nicht weiter betrachtet.

Ebenfalls mit dem Ziel der Effizienzsteigerung präsentieren Capar und Kuby [15, p. 142] in ihrer Veröffentlichung eine neue Formulierung des FRLM: Die Methode, die als „Arc cover-path-cover“ bezeichnet wird, bewertet nicht mehr Knoten der Karte auf ihre Eignung eines Infrastrukturstandorts, sondern platziert eine definierte Anzahl von Tankstellen an den Karten-Kanten und versucht mit diesen eine möglichst große Abdeckung des Verkehrsflusses zu erzielen.

iii. Funktionale Erweiterungen des FRLM

Die letzte, für diesen Bericht relevante Erweiterung des FRLM stellen Kim und Kuby [16, p. 5406] mit dem Deviation-Flow-Refueling Location Model (DFRLM) vor: Sie berücksichtigen zusätzliche Umwege, die ein Fahrer zu absolvieren bereit ist, um eine nahegelegene Tankstelle zu erreichen. Somit können auch Routen von einem Infrastrukturstandort bedient werden, die diesen in einer definierten Entfernung tangieren. Hierfür werden zu Beginn des Algorithmus alle möglichen Umwege auf jeder O-D-Beziehung generiert und anschließend als mögliche O-D-Route berücksichtigt.

Weiterentwicklungen des FRLM umfassen die Berücksichtigung der Stationskapazitäten [17] sowie das FRLM mit Budget-Randbedingungen [18] dar. Diese werden jedoch aufgrund ihrer spezifischen Fragestellungen für den vorliegenden Bericht nicht weiterverfolgt.

iv. Konkrete Anwendungsbeispiele aus der Literatur

Neben den theoretischen Ansätzen und modellbasierten Auslegungsalgorithmen wurden in der Literatur bereits vereinzelte Fallstudien vorgestellt, die sich jeweils auf eine Region beziehen. So beschäftigte sich Odgen [19] 1999 mit der Platzierung von HRS zum Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur in Südkalifornien. Brey et al. [20] stellten 2014 eine Auslegungsstudie für H₂-Stationen in Andalusien vor. Für Deutschland wurde in einer Fallstudie von Linde [21, p. 101] 2005 der „HyWay-Ring“ vorgestellt und Schwoon [22] zeigte 2007 mit seinem Modell die Wechselwirkungen zwischen FCHV-Käufern und Infrastrukturplatzierungen auf.

b) Rahmenbedingungen beim Ausbau der H₂-Infrastruktur in Deutschland

Der H₂-Infrastrukturausbau in Deutschland wird derzeit zu großen Teilen von BMVI, NOW GmbH und H2 Mobility vorangetrieben. Aus finanziellen Gründen werden vorzugsweise bestehende Tankstellenstandorte von konventionellen Fahrzeugen um H₂-Infrastruktur erweitert, um die initialen Kosten für eine Standorterschließung zu vermeiden. Aus diesem Grund wurde dieses Arbeitspaket unter der Randbedingung bearbeitet, dass als potentielle Standorte ausschließlich Tankstellen betrachtet werden, die zum Vertriebsnetz der Gesellschafter von H2 Mobility (Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell und TOTAL) gehören. Weiterhin erfolgen die Auslegungen unter Berücksichtigung der bereits bestehenden Infrastruktur, sodass die hier vorgestellten Ergebnisse jeweils als zukünftige Ausbaustufen des deutschen H₂-Infrastrukturnetzes verstanden werden können.

c) Umsetzung und Ergebnisse aus der Auslegung eines Tankstellennetzwerks für den Großraum München

Für die Auslegung eines Tankstellennetzwerks für den Großraum München standen im Rahmen des Projekts die Bewegungsdaten aus dem Flottenversuch BeeZero zur Verfügung. Bei diesem Datensatz ist jedoch zu beachten, dass das erfasste Mobilitätsverhalten ein sehr spezifisches System (FCEV-Fahrzeuge in einem Carsharing-Kontext) repräsentiert. Somit kann für ein darauf basierendes Tankstellennetzwerk keine Allgemeingültigkeit für andere Anwendungsfälle sichergestellt werden.

Um dennoch eine möglichst gute Aussagekraft über die zukünftige Entwicklung der Tankstelleninfrastruktur im Raum München zu erlangen, findet an dieser Stelle ein ortsbasiertes Modell Anwendung, das durch die aufgezeichneten Mobilitätsdaten gestützt wird.

Zunächst erfolgt eine Einteilung des Münchner Stadtgebiets in vier Bezirke anhand der folgenden Standortfaktoren: Anzahl volljähriger Einwohner, Motorisierungsgrad sowie Anteil an Neuzulassungen von allen privat zugelassenen Fahrzeugen. Je Bezirk wird in Abhängigkeit der Standortfaktoren eine Anzahl von zukünftig erforderlichen Tankstellen abgeleitet und durch Berücksichtigung der bereits vorhandenen Standorte die Anzahl der noch zu positionierenden Standorte definiert.

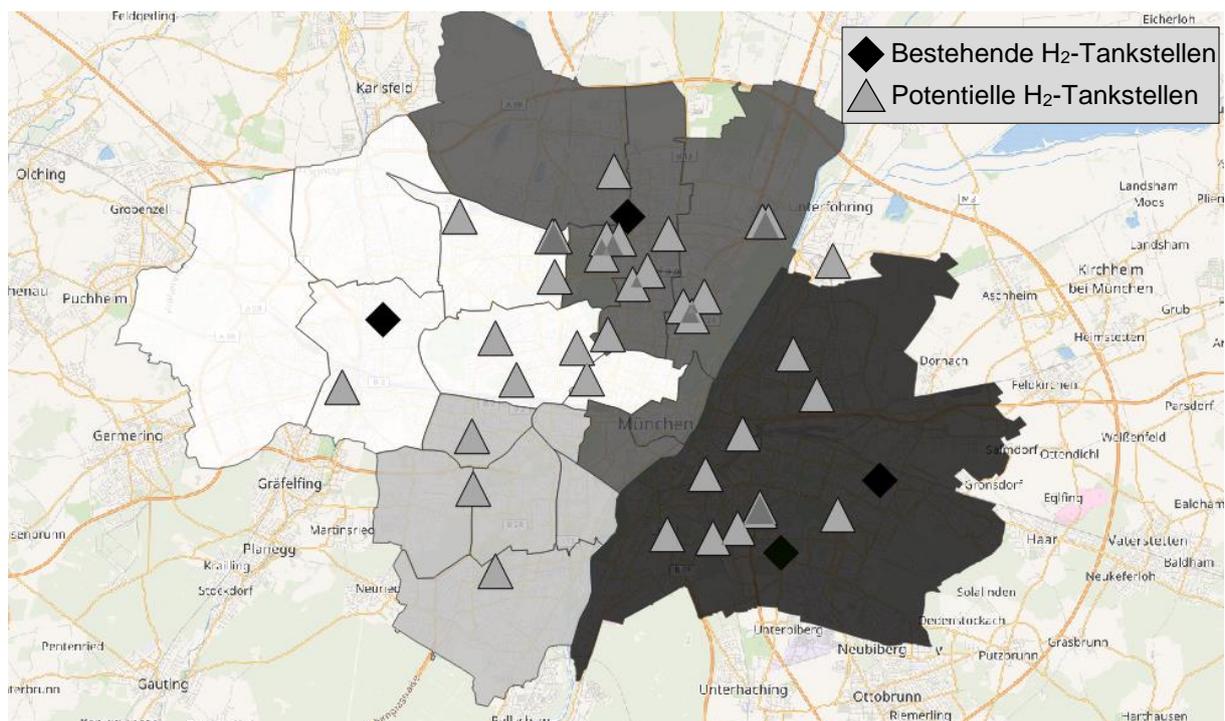


Abbildung 32: Bestehende HRS-Infrastruktur und potentielle Standorte für HRS im Großraum München [23, p. 45]

Die für die Positionierung in Frage kommenden 36 Infrastrukturstandorte im Münchner Stadtgebiet werden innerhalb der unterteilten Stadtbezirke identifiziert (Abbildung 32). Nachfolgend wird für jeden potentiellen Standort eine prognostizierte Nachfrage mithilfe der Mobilitätsdaten des BeeZero-Flottenversuchs errechnet: Sofern ein Fahrzeug einen Standort innerhalb eines definierten Radius tangiert und der

Tankstand am Ende der Fahrt unter einem Grenzwert von 40% liegt, kommt diese Fahrt für einen Tankvorgang in Frage und die resultierende Nachfrage wird dem Standort zugerechnet.

Abschließend werden sukzessive die Standorte ausgewählt, die die größte potentielle Nachfrage bedienen können. Um jedoch den im Stand der Literatur diskutierten Kannibalisierungseffekt zu reduzieren, wird je Standort ein „Einzugsradius“ von 1,25 km definiert. Sofern sich die Einzugsradien zweier Tankstellenstandorte überschneiden, wird diejenige Tankstelle ausgewählt, die die höhere Nachfrage bedienen kann.

In Abbildung 33 ist das Ergebnis der Auslegung für den Großraum München dargestellt. Es wurden zu den bestehenden Tankstellen noch weitere sechs Standorte hinzugefügt, die im Vergleich zu den Vorhandenen das Stadtgebiet rund um das Zentrum erschließen. Die zentrale Anordnung ergibt sich aus der Anordnung der potentiellen Standorte konventioneller Tankstellen in München. Dies spiegelt jedoch auch die grundlegende Eigenschaft des BeeZero-Datensatzes wider, dass sich das Verkehrsaufkommen im Stadtzentrum durch die Lage der sogenannten Homezones als überproportional groß herausstellte. Innerhalb des „Altstadtringes“ (im Stadtkern Münchens) werden keine Tankstellen platziert, weil in diesem Bereich keine relevanten Verkehrsbewegungen stattfinden.

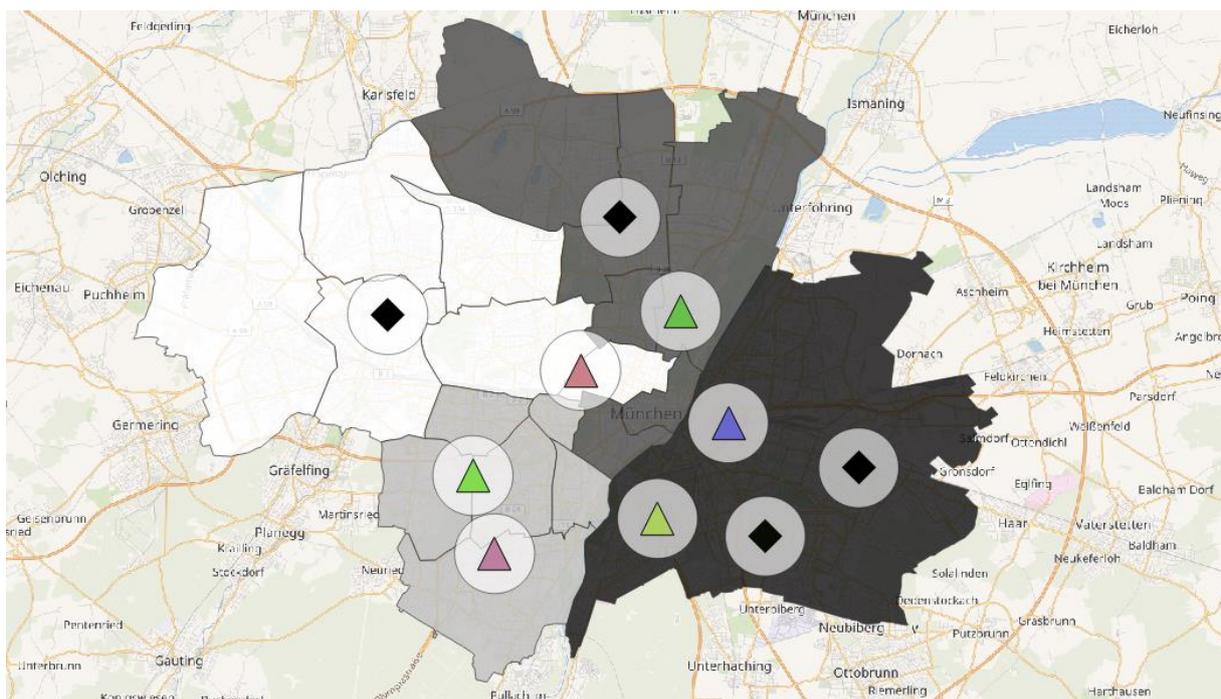


Abbildung 33: Auslegungsergebnis für die Auswahl von HRS-Standorten im Großraum München [23, p. 48]

Zusammenfassend wird das Münchner Stadtgebiet durch die vorgestellte Auslegung für die flächendeckende Einführung von Wasserstoffmobilität erschlossen. Es gilt einerseits zu beachten, dass im Norden und Nord-Westen keine HRS-Standorte vorgeschlagen werden, weil sich dort derzeit keine Tankstellen befinden, die zum Vertriebsnetz der Gesellschafter von H2 Mobility gehören. Zum anderen sollte in weiteren Untersuchungen die Einbettung des Münchner Stadtgebiets unter

Berücksichtigung von Pendler-Strömen und den das Stadtgebiet tangierenden Durchgangsverkehr betrachtet werden, um eine ausreichende Anbindung an die Metropolregion des Landkreises München sicherzustellen.

6) AP 2.6: Überregionale Infrastrukturplanung für den flächendeckenden Einsatz von FCEV (TUM)

a) Vorgehen und Methodik zur Planung überregionaler Infrastruktur

In einem weiteren Schritt erfolgt die überregionale Infrastrukturplanung für das deutsche Bundesgebiet. Weil sich die im Rahmen des vorliegenden Projekts betriebene Carsharing-Flotte in erster Linie in München und Umgebung aufhielt und sich somit keine Verkehrsdaten für Fahrten über München hinaus erfassen ließen, wurde für dieses Arbeitspaket auf einen statistischen Mobilitätsdatensatz („Verkehrsverflechtungsprognose (VVP)“ [24]) zurückgegriffen. Die VVP bildet O-D-Beziehungen auf (Land-)Kreis-Ebene (NUTS-3) ab und gibt das Verkehrsvolumen für verschiedene Modalitäten (MiV, Bahn, Flugzeug) je Tupel aus Start- und Zielzelle an. Neben dem statistischen Datensatz für das Jahr 2010 enthält der VVP-Datensatz auch eine Prognose für das Jahr 2030. Diese wird für die Infrastrukturauslegung in diesem Arbeitspaket verwendet, um Infrastrukturplanung bereits jetzt auf die zukünftige Verkehrsentwicklung auszurichten.

Als Ausgangspunkt für die überregionale Infrastrukturplanung kommt der Ansatz des FCLM zum Einsatz: Um zu berücksichtigen, welchen Weg Fahrer von der Start- zur Zielzelle nehmen, wird zunächst ein Routing der O-D-Beziehungen vorgenommen. Mithilfe der Open-Source-Bibliothek „Graphhopper“ auf Basis von Open Street Maps (OSM) wird die „schnellste Route“ berechnet und das Verkehrsvolumen der Route auf alle überfahrenen Knoten aufaddiert. Somit resultiert eine Liste von OSM-Knoten, die je Knoten das zugehörige kumulierte Verkehrsvolumen enthält.

Der VVP-Datensatz gibt je O-D-Beziehung nur an, welche Start- und Zielzelle verwendet wurde, jedoch nicht den exakten Start- und Zielpunkt von Fahrten. Weil ein Routing nur zwischen definierten Punkten möglich ist, wurden die Zentren (Hauptstädte) der NUTS3-Regionen als Start- und Zielorte verwendet. Dies führt jedoch beim Addieren des Verkehrsvolumens zu Fehlern in den Zellzentren, weil die Straßenabschnitte um die Zentren das gesamte Volumen des aus der Zelle heraus- und hereinführenden Verkehrs zugerechnet bekommen. Dies entspricht nicht der Realität und hätte eine übermäßige Gewichtung der Hauptstädte bei der Platzierung von HRS-Standorten zur Folge. Daher wurde das Verkehrsvolumen erst außerhalb der Start- und Zielzelle berücksichtigt und somit der Fokus auf großflächigere Verkehrsverflechtungen im Sinne einer überregionalen Infrastrukturplanung gelegt.

Um ausgehend vom Verkehrsvolumen auf potentielle Infrastrukturstandorte zu schließen, muss analog zum Vorgehen in AP 2.5 ein „Einzugsradius“ definiert werden, in dem der Tankstellenstandort als „erreichbar“ gilt. Die Luftliniendistanz zu einem angrenzenden HRS-Standort ist jedoch gerade im Fernverkehr auf Autobahnen wenig aussagekräftig, weil bspw. ein direkt neben der Autobahn liegender HRS-Standort erst über die nächste Ausfahrt erreicht werden kann oder ein HRS-Standort auf einem Rastplatz nur aus einer Richtung der Autobahn erreichbar ist.

Daher wird in diesem Arbeitspaket der „Einzugsradius“ in Form von „Isochronen“ definiert. Bei einer Isochrone handelt es sich um ein Polygon um einen Ausgangspunkt, dessen Rand unter Berücksichtigung der durchschnittlich gefahrenen Geschwindigkeiten in einer bestimmten maximalen Zeit zu erreichen ist. Beispielsweise kann eine Zwei-Minuten-Isochrone für Kraftfahrzeuge um einen Autobahn-Rastplatz entlang der Fahrtrichtung mehrere Kilometer der Autobahn enthalten, jedoch nicht die gegenüberliegende Fahrspur. Mit der Isochronen-basierten Betrachtung wird weiterhin dem Phänomen Rechnung getragen, dass Fahrer den Nachteil von Umwegen in erster Linie anhand der zeitlichen Auswirkung auf die Gesamtfahrdauer wahrnehmen.

In diesem Arbeitspaket dienen erneut bestehende Tankstellen als Ausgangsbasis für mögliche HRS-Standorte. Für das deutsche Bundesgebiet wurden diese aus den öffentlichen OSM-Kartendaten ermittelt. Zunächst erfolgt für jede bestehende Tankstelle die Kumulierung des Verkehrsvolumens, das auf den OSM-Knoten innerhalb der Isochrone um die Tankstelle stattfindet. Anschließend wird aus dieser Liste immer der Standort extrahiert, der in seinem Einzugsgebiet das größte Verkehrsvolumen abdeckt. Bevor die Auswahl eines Standorts erfolgt, wird überprüft, ob sich die Isochrone mit dem Einzugsgebiet einer bereits platzierten HRS überschneidet. Sofern dies der Fall wäre, würde es zwischen den beiden Standorten zu Kannibalisierungseffekten kommen. Daher wird der Standort mit dem geringeren abgedeckten Verkehrsvolumen verworfen und es kann davon ausgegangen werden, dass der bereits ausgewählte Standort das Verkehrsvolumen des schlechteren Standorts mit bedienen kann.

b) Ergebnisse der Planung überregionaler Infrastruktur

Das beschriebene Vorgehen wurde im Rahmen des Projekts implementiert und für unterschiedliche Parametervariationen durchgeführt. Neben der Anzahl der zu platzierenden Tankstellen und dem Mindestabstand zweier Standorte zueinander kann die maximal vom Fahrer tolerierte Dauer für einen Umweg variiert werden.

Eine Auffälligkeit, die sich bei den Analysen zeigt, ist die Konzentration vorgeschlagener HRS-Standorte entlang von Autobahnstrecken. Die Auflösung der O-D-Beziehungen auf (Land-)Kreis-Ebene ist für das beschriebene Arbeitspaket ausreichend, lässt jedoch nur eine Fokussierung auf den Fernverkehr zu, da eine exakte Lokalisierung des Start- und Zielorts innerhalb der Gebietszellen nicht möglich ist. Die Bedingung, das Verkehrsvolumen eines Routings nur außerhalb der Start- und Zielzelle zu berücksichtigen, hat hierbei zur Folge, dass kleinere Straßen zu Beginn und am Ende von Fahrten unberücksichtigt bleiben. Weiterhin werden keine Fahrten innerhalb der Gebietszellen berücksichtigt, weil das Routing nur von Zellzentrum zu Zellzentrum stattfinden würde. Kleinere Straßen werden durch diese Bedingungen deutlich unterrepräsentiert, weil Fahrten beim Übergang aus der Start- und in die Zielzelle meist bereits bzw. noch auf einer höherrangigen Fernstraße stattfinden.

Zur Sicherstellung einer Mindestversorgung für eine flächendeckende Wasserstoffinfrastruktur sind derzeit in Deutschland 100 Tankstellen veranschlagt. Diese Zahl kann durch die Ergebnisse dieses Arbeitspakets bestätigt werden, jedoch ist anzumerken, dass diese Zahl sehr stark vom Auslegungsziel und der hierfür

angesetzten Parameter für Mindestabstand und Umweg-Dauer abhängig ist. Den Einfluss des Mindestabstands zeigen Abbildung 34, Abbildung 35 und Abbildung 36: Hierbei wurden drei unterschiedliche Szenarien mit Mindestabständen von 20 km, 40 km und 70 km bei konstant gehaltener Tankstellenanzahl (100 Stück) und konstantem Einzugsradius (5-Minuten-Isochronen) errechnet.

Zwar bewirkt ein Mindestabstand von 20 km eine dichte Abdeckung auf der Hauptverkehrsachse München – Stuttgart – Frankfurt a.M. – Köln, jedoch kann für diese Parameterkonfiguration keine ausreichende Wasserstoffversorgung in Ostdeutschland sichergestellt werden. Dieses Phänomen ist durch die deutlich höheren Verkehrsvolumina zwischen den Metropolregionen in Westdeutschland zu erklären, die sich in der HRS-Positionierung niederschlagen. Eine Erhöhung des Mindestabstands auf 70 km bezweckt ein sehr gleichmäßig verteiltes Tankstellennetz, allerdings ist die Auslegung dabei deutlich unabhängiger von den realen Verkehrsvolumina und unterrepräsentiert die hohen Verkehrsströme in den Metropolregionen.

Für einen Mindestabstand von 40 km entzerrt sich die Hauptverkehrsachse gegenüber der 20 km-Berechnung in Richtung Osten, sodass eine flächige Abdeckung ganz Deutschlands unter Berücksichtigung der Reichweiten derzeitiger FCEV ermöglicht wird. Vorteilhaft gegenüber der 70 km-Berechnung ist die erhaltene Berücksichtigung von hohem Verkehrsaufkommen in Metropolregionen.

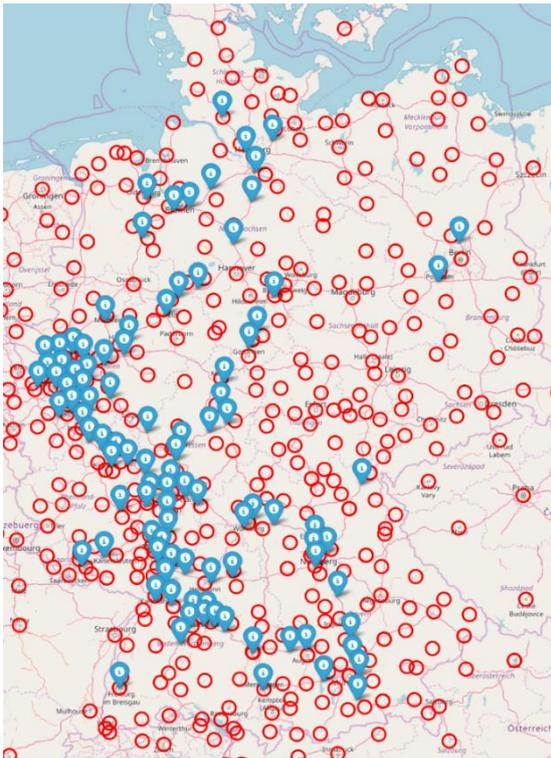


Abbildung 34: Tankstellenauslegung von 100 HRS mit **20 km Mindestabstand** und 5-Minuten-Isochronen [25, p. 100]

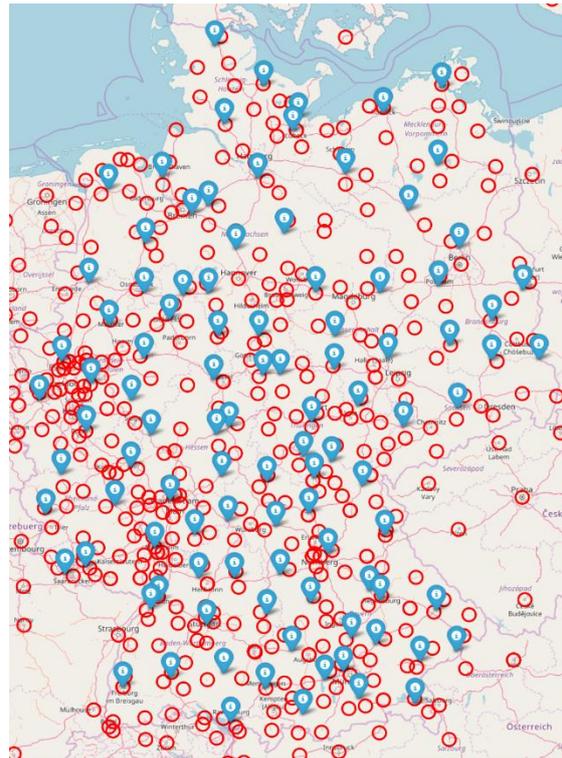


Abbildung 35: Tankstellenauslegung von 100 HRS mit **70 km Mindestabstand** und 5-Minuten-Isochronen [25, p. 104]

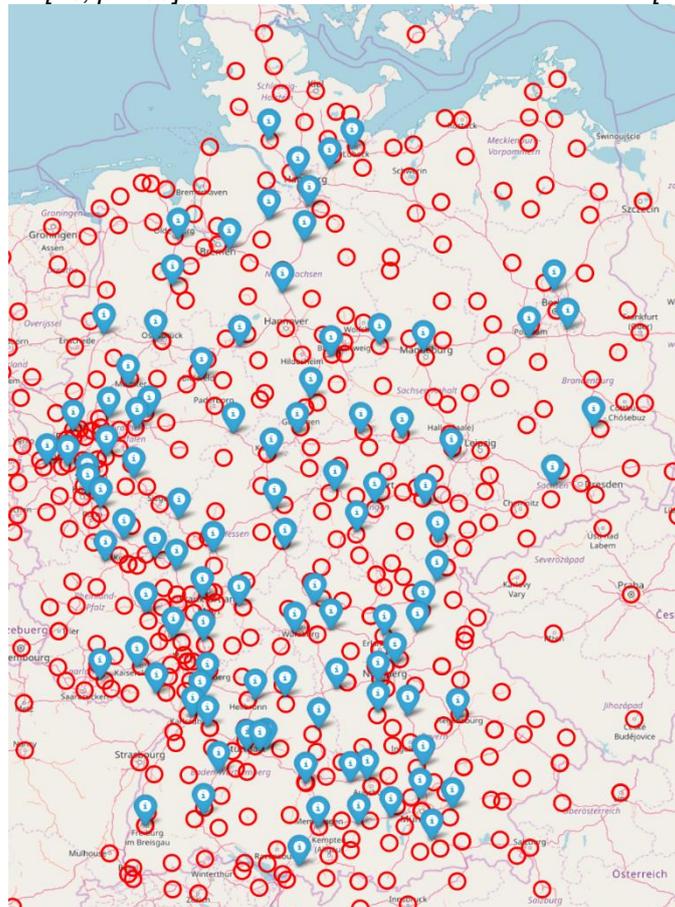


Abbildung 36: Tankstellenauslegung von 100 HRS mit **40 km Mindestabstand** und 5-Minuten-Isochronen [25, p. 102]

c) Zusammenfassung und Ausblick nationale Infrastrukturplanung

In diesem Arbeitspaket wurde auf Basis des FCLM eine Methodik zur überregionalen Wasserstoff-Infrastrukturplanung in Deutschland vorgestellt. Diese nutzt den statistischen Datensatz „Verkehrsverflechtungsprognose“ für das Jahr 2030 und bildet damit in erster Linie den Fernverkehr ab, der in ca. 10 Jahren in Deutschland zu erwarten ist. In Summe werden 100 HRS-Standorte aus den bereits bestehenden Kraftstoff-Tankstellen ausgewählt, die bei einer zukünftigen Erweiterung durch Wasserstoff-Zapfsäulen den größtmöglichen Mehrwert für den Fernverkehr des MiV-Sektors bieten.

Es ist zu beachten, dass es sich zwar bei den Verkehrsströmen um Prognosen handelt, jedoch nur derzeit bestehende Tankstellenstandorte berücksichtigt werden können. Aus diesem Grund wird empfohlen, diese Methodik bei zukünftigen Standortplanungen mit einer aktualisierten Datenbasis anzuwenden.

Die Parameter, die in der vorgestellten Methodik eingesetzt wurde, wirken sich auf die Standortauswahl wie folgt aus:

- Isochronen-Größe: Größere Isochronen bewirken größere maximale Umwege und erlauben damit auch „ländlichere Standorte“, die dennoch den Verkehrsstrom angrenzender Autobahnen zugeschrieben bekommen. Je kleiner die Isochronen gewählt werden, desto mehr fokussiert sich die Standortauswahl auf Hauptverkehrsrouten und viel befahrene Straßenabschnitte wie Autobahnen.
- Anzahl der Tankstellen: Eine flächendeckende Wasserstoffversorgung für den Fernverkehr ist in Deutschland bereits ab ca. 100 Standorten gegeben. Der Mindestabstand zwischen zwei Tankstellen unterschreitet dabei bereits deutlich die Reichweite heutiger FCEV. Für einen feinmaschigen Ausbau und die Einführung von FCEV in der Breite muss die Anzahl der Tankstellen jedoch deutlich erhöht werden. FCEV-Besitzer, die in schlecht erschlossenen Gebieten wohnen, müssten bei einer derzeitigen Auslegung von 100 Standorten Distanzen von bis zu 200 km bis zur nächsten Tankstelle zurücklegen. Gerade in städtischen Gebieten, in denen die Durchschnittsgeschwindigkeit deutlich niedriger liegt, muss die Tankstellendichte erhöht werden, um tolerierbare Fahrzeiten zu HRS-Standorten zu realisieren.
- Mindestabstand: Der Mindestabstand von Tankstellen stellt den einflussreichsten Parameter in der gezeigten Methodik dar. Eine Reduzierung dieses Parameters bewirkt eine am Verkehrsvolumen orientierte Auslegung, eine Vergrößerung begünstigt eine gleichmäßigere Verteilung und damit flächendeckendere Auslegung von HRS-Standorten.

7) AP 2.7: Erforschung Net-Promoter-Score zur Tankstellenakzeptanz

Das Arbeitspaket 2.7 hatte die Nutzung des sogenannten *net promoter scores* (NPS, Bewertungsskala 1-10) zur Bewertung der Tankstellenakzeptanz zum Ziel. Da die Erforschung des NPS im engen Zusammenhang mit der Untersuchung der

Fahrmuster zum Einsatz kam, sei hier auf die Ausführungen im Rahmen des AP3.7 verwiesen.

AP 3: Forschungsvorhaben Endnutzer

Das Geschäftskonzept von BeeZero lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Zonenbasiertes Carsharing (mit sogenannten Homezones)
- Ausleihe und Rückgabe jeweils in gleicher Zone, somit sind nur sogenannte „Roundtrips“ erlaubt
- Die Abrechnung erfolgte nach Zeit und gefahrenen km (Minuten- und km-genaue Pauschalpreise, die am Ende addiert wurden)
- Es existierten Paketpreise für längere Ausleihen, um bspw. die Ausleihe für 6 h, 12 h, 24 h oder 48 h mit einem Kontingent an Inklusivkilometern attraktiver zu gestalten.

1) AP 3.1: Analyse des globalen Mobilitätsverhaltens (Linde/TUM)

Dieser Abschnitt widmet sich dem Mobilitätsverhalten der BeeZero-Nutzer, welches aus den während der Laufzeit des Carsharing-Dienstes aufgezeichneten Daten abgeleitet werden kann. Als Grundlage für die Analysen dient der Datensatz, der sich aus den drei nachfolgend beschriebenen Datenquellen zusammensetzt:

- **Buchungssystem:**
Dieses System umfasste neben der Kundenregistrierung sowohl die Buchungsverwaltung als auch das Abrechnungssystem. Für die Analysen standen pseudonymisierte Nutzerinformationen zur Verfügung (Alter, Geschlecht, Mitarbeiter/Kunde) sowie die Zeitpunkte und Kilometerstände von Reservierungen und Buchungen der Fahrzeuge.
- **Telemetrieinheiten:**
In der Fahrzeugflotte von BeeZero waren Telemetrie-Datenlogger verbaut, die zur Lokalisierung der Fahrzeuge (Monitoring während des Betriebs) und zur Ausleihe durch Kunden benötigt wurden (z.B. Rückgabe nur innerhalb der Zonen). Durch die Datenlogger wurden einerseits Events (u.a. Zündung an/aus) sowie andererseits Trackings (GPS-Punkte mit Zeitstempeln) aufgezeichnet, sodass damit die räumliche Verteilung und Bewegung der Fahrzeugflotte beobachtet werden konnte.
- **Tankrechnungen:**
Für die Betankung von Wasserstofffahrzeugen an HRS (hydrogen refueling stations) werden in Deutschland derzeit Tankkarten benötigt. Diese dienen der Abrechnung der Betankungen mithilfe eines zentralen Abrechnungssystems, dessen Daten (Zeitpunkt der Betankung, HRS-Station, Betankungsmenge) ebenfalls für die Analysen zur Verfügung standen.

Zur Einordnung der Ergebnisse des globalen Mobilitätsverhaltens wird zunächst auf die Struktur der registrierten Kunden von BeeZero hinsichtlich Alter und Geschlecht eingegangen. Anschließend werden die Analyseergebnisse des globalen räumlichen Mobilitätsverhaltens aufgeführt. Die statistische Analyse des zeitlichen Mobilitätsverhaltens (Buchungsverhalten, Mietdauern etc.) findet sich in Arbeitspaket AP 3.7 (Erforschung Fahrmuster).

a) Charakterisierung der registrierten Nutzer

Im ersten Schritt wird auf die Nutzerstruktur der registrierten BeeZero-Kunden eingegangen. Abbildung 37 zeigt die prozentuale Alters- und Geschlechterverteilung der registrierten Nutzer. Auffällig ist der große Anteil von jungen Kunden (21 – 49 Jahre), wobei der größte Anteil im Altersbereich 30 – 39 liegt und die ältere Kategorie (40 – 49) weniger stark vertreten ist als die jüngere (21 – 29). Im Alter von 50 – 59 Jahren hatten sich bereits deutlich weniger Nutzer registriert und nur noch ein einstelliger Prozentsatz von Kunden war älter als 60 Jahre. Die Charakteristik der Altersverteilung ist über die Geschlechter gleichmäßig verteilt, allerdings ist nur ein Viertel der angemeldeten Nutzer weiblich.

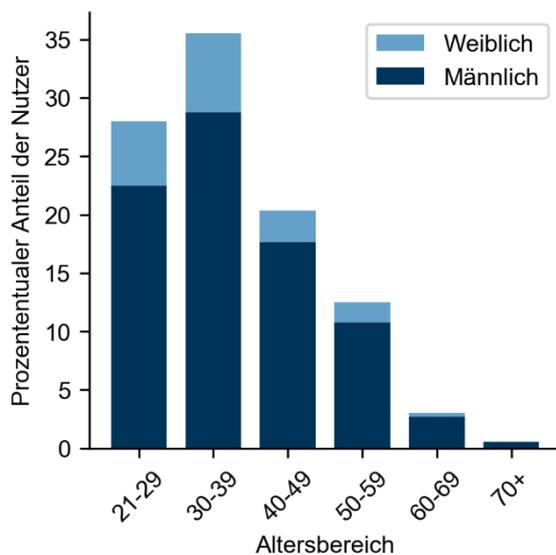


Abbildung 37: Histogramm der Altersverteilung der registrierten Nutzer aufgeteilt nach Geschlecht

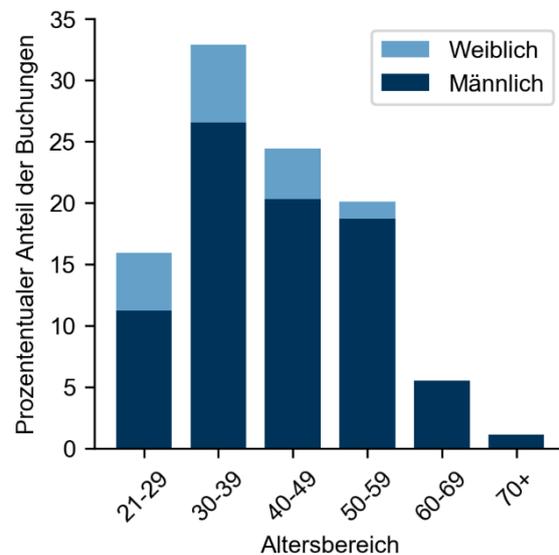


Abbildung 38: Histogramm der Buchungshäufigkeit der registrierten Nutzer nach Alter und Geschlecht

Um die „Aktivität“ der einzelnen Alters- und Geschlechtsgruppen beurteilen zu können, zeigt Abbildung 38 die prozentualen Anteile der einzelnen Gruppen an der gesamten Buchungsanzahl. Im Vergleich zur Anzahl der registrierten Kunden wird eine deutliche Verschiebung hin zu älteren Nutzern deutlich. Ältere Nutzer nehmen den Carsharing-Dienst häufiger in Anspruch, wohingegen gerade die jüngste Kundengruppe (21 – 29) den Dienst im Vergleich zur registrierten Nutzerzahl unterdurchschnittlich nutzt. Eine mögliche Erklärung für die hohe Anzahl junger Nutzer und deren geringe tatsächliche Nutzung sind Marketing-Aktionen, die u.a. an Universitäten durchgeführt wurden, um jungen Nutzern (vor allem Studierenden) eine kostenlose Registrierung zu ermöglichen.

b) Räumliches Mobilitätsverhalten: Zonenaktivität

Als erster Schritt im Hinblick auf die Beurteilung des räumlichen Mobilitätsverhaltens können die Homezones und die darin stattgefundenen Kundenbuchungen analysiert werden. Da die Zonen jedoch nicht alle gleich lange aktiv und einzelne Zonen im Rahmen der „BeeZerotation“ nur temporär verfügbar waren, ist zur Vergleichbarkeit eine Normierung mit den Betriebstagen der Zone erforderlich. Der Quotient aus

Kundenbuchungen und Betriebstagen wird als „Zonenaktivität“ in Buchungen pro Tag bezeichnet. Um die „normierte Zonenaktivität“ zu erhalten, wird der Quotient aus Zonenaktivität und durchschnittlicher Zonenaktivität gebildet.

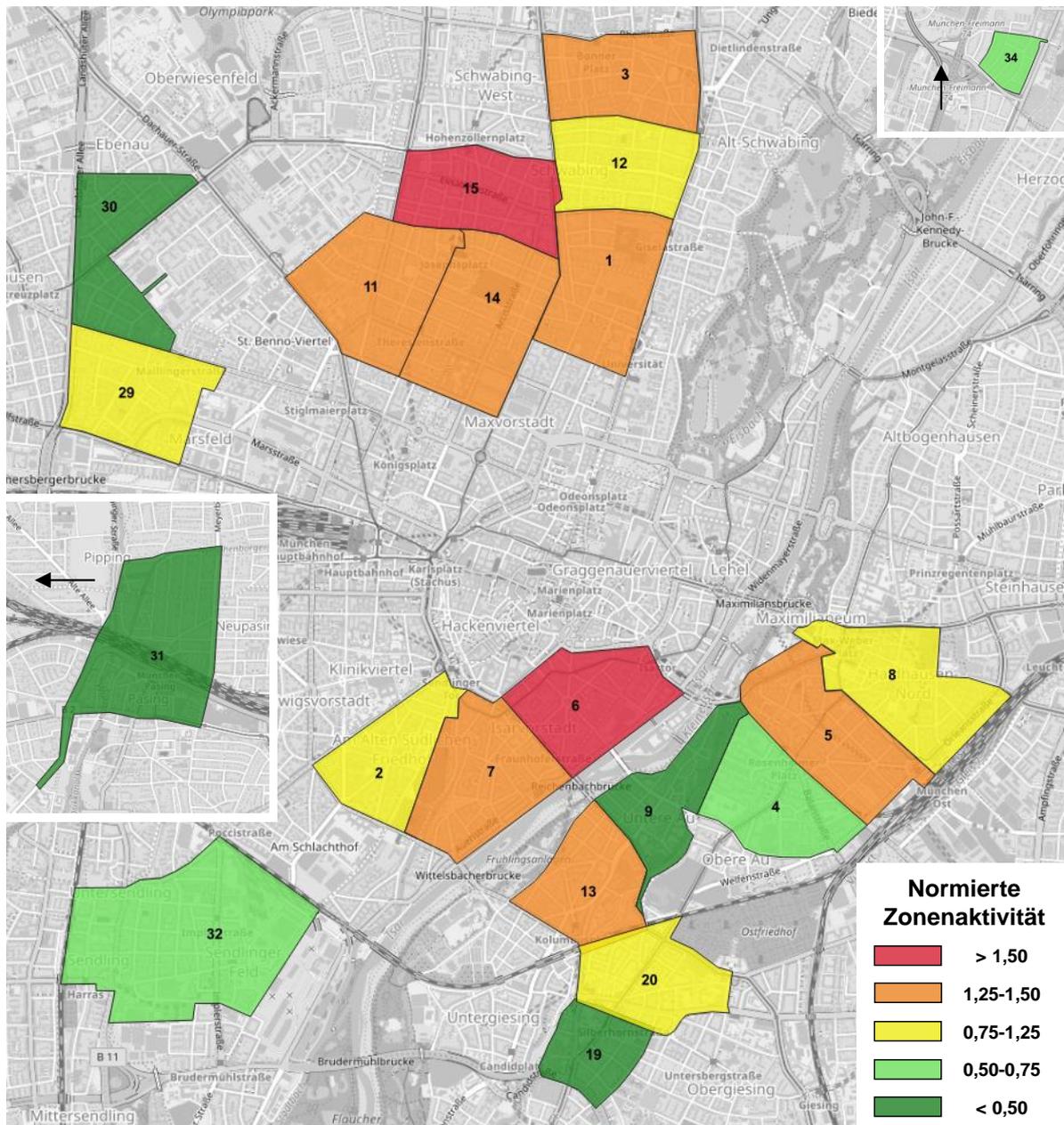


Abbildung 39: Normierte Zonenaktivität der BeeZero-Homezones (Nummerierung nach Zonen-ID) [26, p. 57]

Die normierten Zonenaktivitäten sind in Abbildung 39 dargestellt. Eine hohe Zonenaktivität (rot) bedeutet eine überdurchschnittliche Nutzung und es zeigt sich, dass gerade zentral gelegene Zonen aktiver sind als die außenliegenden Zonen (19, 30, 31, 32, 34). Mögliche Erklärungen bieten die geringere Bevölkerungsdichte sowie der zunehmende Privatfahrzeugbesitz in den außenliegenden Zonen, sodass dort zum einen weniger Kunden durch Carsharing-Systeme angesprochen werden und diese wenigen Kunden zusätzlich durch den Besitz eines eigenen Fahrzeugs ein geringeres

Mobilitätsbedürfnis hinsichtlich Carsharing aufweisen. Im Stadtzentrum hingegen wird das Carsharing häufiger genutzt.

Beim Carsharing BeeZero kamen innovative Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb zum Einsatz, sodass interessierte Kunden das Carsharing möglicherweise auch zum Kennenlernen der Brennstoffzellen-Technologie nutzten. Gerade für die hohe Zonenaktivität von Zone 6 im Stadtkern könnte dies ein relevanter Einflussfaktor sein. Dort liegt ein zentraler Knotenpunkt des öffentlichen Nahverkehrs (Marienplatz). Kunden könnten aus Gebieten, in denen der Carsharing-Dienst nicht zur Verfügung steht, mit öffentlichen Verkehrsmitteln anreisen, um sich vor Ort ein Auto auszuleihen und beispielsweise eine Ausflugsfahrt ins Münchner Umland durchzuführen. Diese These kann jedoch aus den vorliegenden Daten weder bestätigt noch widerlegt werden, weil keine Informationen über die Wege der Kunden vor und nach Buchungen vorliegen.

c) Räumliches Mobilitätsverhalten: Bevorzugte Zielorte (Points of Interest)

Nachdem im vorhergehenden Abschnitt die räumliche Verteilung der Startpunkte auf das Geschäftsgebiet gezeigt wurde, stellt sich nun die Frage, welche Zielorte von BeeZero-Kunden besucht wurden, um daraus auf den Fahrtzweck der Kunden zu schließen.

Die Grundlage hierfür bilden die erfassten Mobilitätsdaten, in denen das Ein- und Ausschalten des Fahrzeugs mit den jeweiligen GPS-Positionen verknüpft ist. Zur Erkennung von häufig besuchten Orten kommt der dichte-basierte Clustering-Algorithmus DBSCAN (engl.: density-based spatial clustering of applications with noise) zum Einsatz, der Ansammlungen von Zielpositionen identifiziert. Abbildung 40 zeigt einen Ergebnisausschnitt des Clusterings. Insgesamt wurden 122 Cluster im Stadtgebiet München (orange Fläche) und 80 Cluster außerhalb des Stadtgebiets identifiziert. Deutlich erkennbar ist eine Konzentration der Gruppen im Zentrum des Münchener Stadtgebiets. Im Gegensatz dazu sind die Cluster im Umland weiter voneinander entfernt, sodass außerhalb des Stadtgebiets eine stärkere Streuung der Cluster vorliegt.

In der Literatur haben sich für POI (engl.: Points of Interest, beliebte Zielorte) Kategorien etabliert, denen die Orte öffentlichen Interesses zugeordnet werden. Die für den vorliegenden Bericht verwendeten Kategorien sowie die jeweilige Anzahl von Objekten, die je Kategorie berücksichtigt wurden, ist in Tabelle 14 dargestellt.

Um Fahrtzwecke von Kunden untersuchen zu können, ist die Zuordnung der oben genannten Zielpunkt-Cluster zu den POI-Kategorien erforderlich. Dies erfolgt mithilfe eines sogenannten Referenzgebiets um das Clusterzentrum und anhand eines dualen Ansatzes: Sowohl die relative Häufigkeit der POI im betrachteten Referenzgebiet als auch die Distanz der POI zum Clusterzentrum fungieren als Kriterien, damit eine möglichst realistische Deduktion der Fahrtzwecke gewährleistet ist. Das Referenzgebiet wurde im vorliegenden Projekt als Kreis um das Clusterzentrum festgelegt. Der Kreis weist einen Durchmesser von der Diagonalen der „Bounding Box“ aller GPS-Punkte im Cluster plus einem zusätzlichen „Einzugsgebiet“ von 1 km auf.

Tabelle 14: POI-Kategorien zur Evaluation der Fahrzwecke

Gruppen-ID	Bezeichnung	POI	Anteil
1	Einzelhandel & Dienstleistungen	14.386	28,44 %
2	Sport, Kultur & Freizeit	2.469	4,88 %
3	Transport & Mobilität	1.404	2,78 %
4	Behörden & Öffentliche Einrichtungen	4.605	9,10 %
5	Soziales & Kirchliches	601	1,19 %
6	Gastronomie	2.606	5,15 %
7	Gesundheitswesen	6.749	13,34 %
8	Business	17.758	35,11 %

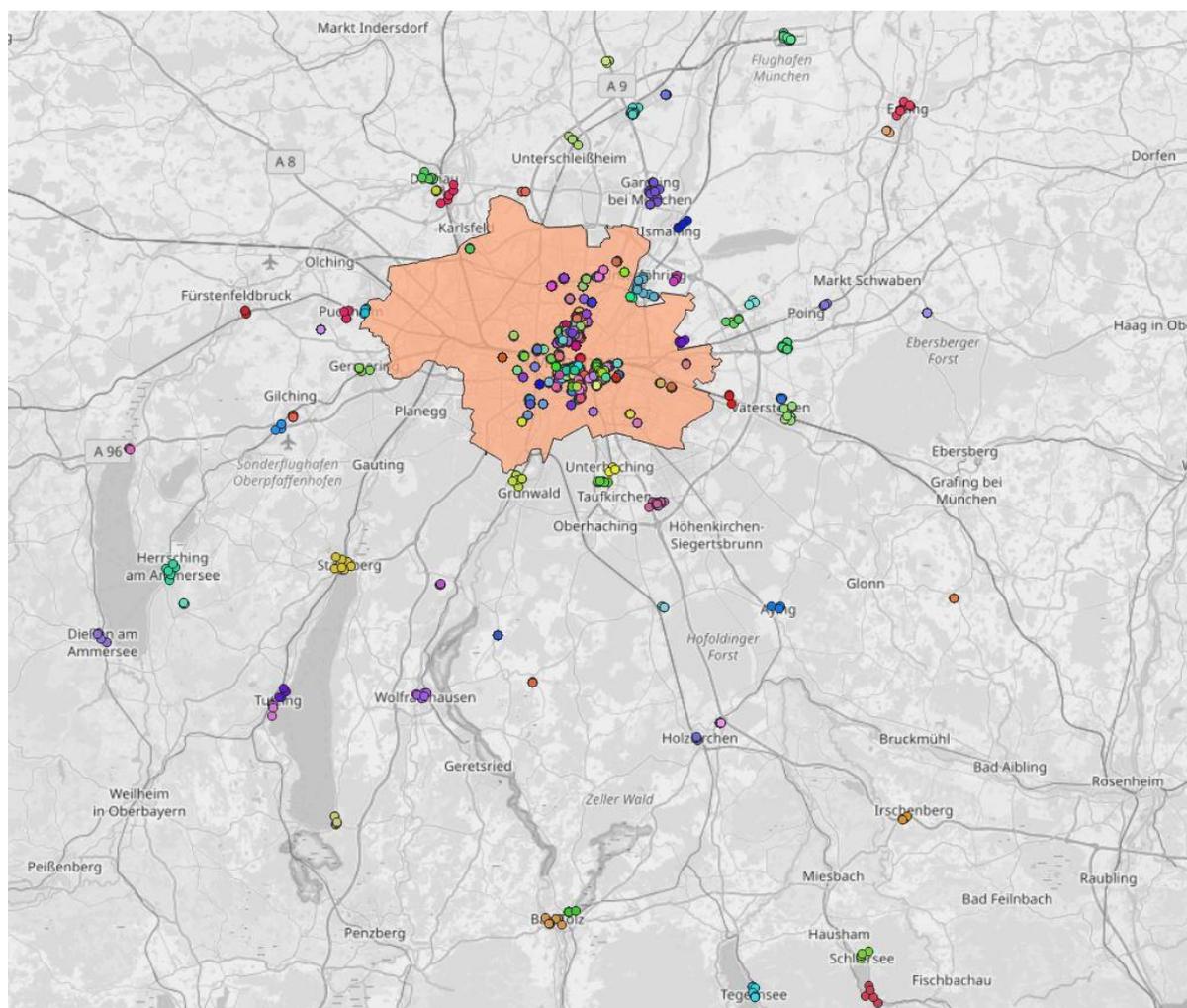


Abbildung 40: Identifizierte Zielort-Cluster, die während Kundenfahrten besucht wurden [26, p. 46]

Die relative Häufigkeit ergibt sich aus der Anzahl der POI einer Kategorie im Referenzgebiet um das Clusterzentrum normiert auf die Gesamtanzahl der POI in der

Kategorie. Dieses stellt sicher, dass der Wahrscheinlichkeit, POI einer bestimmten Kategorie vorzufinden, Rechnung getragen wird. Das Distanzkriterium wird mit einer Kosinus-Funktion für jeden POI im Referenzgebiet berechnet (siehe Abbildung 41) und anschließend arithmetisch gemittelt. Schließlich erfolgt die Zuordnung des Clusters zu einer Kategorie durch die Berechnung des arithmetischen Mittels von Häufigkeits- und Distanzkriterium. Die Kategorie mit der höchsten Bewertung wird schließlich als Zielkategorie und somit für die Interpretation des Fahrtzwecks verwendet.

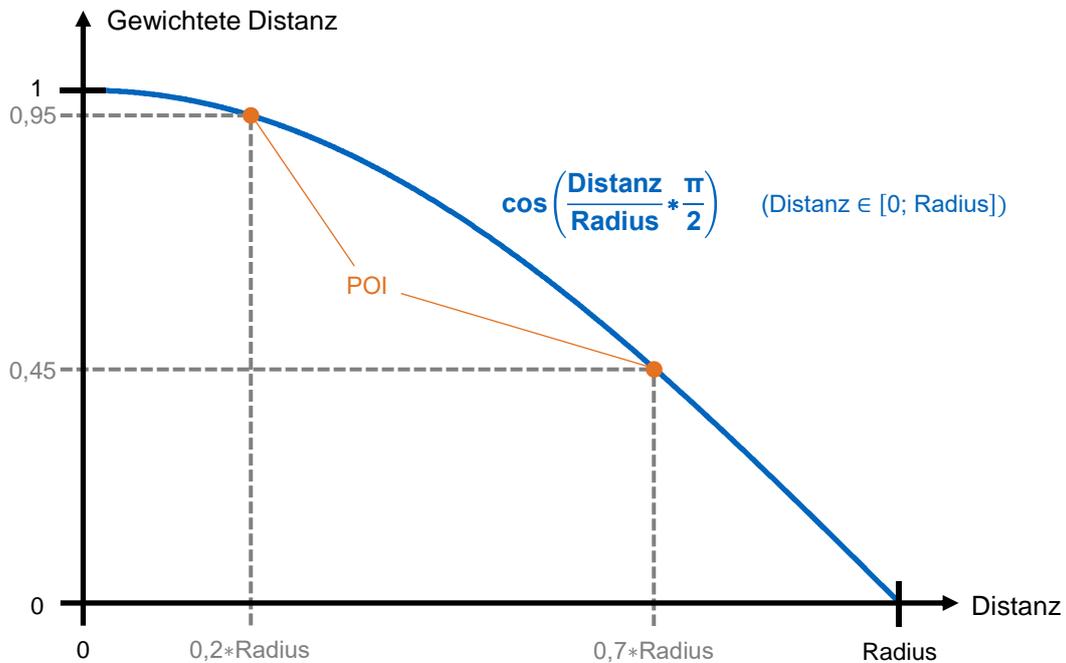


Abbildung 41: Gewichtung der POI-Entfernung zum Clusterzentrum anhand einer Kosinusfunktion [26, p. 50]

Nachfolgende sind die Ergebnisse der Kategorie-Verteilungen in Abhängigkeit verschiedener Faktoren angegeben. Die jeweiligen Unterscheidungskriterien der Clusterbildung sind den Bildunterschriften bzw. den Legenden zu entnehmen.

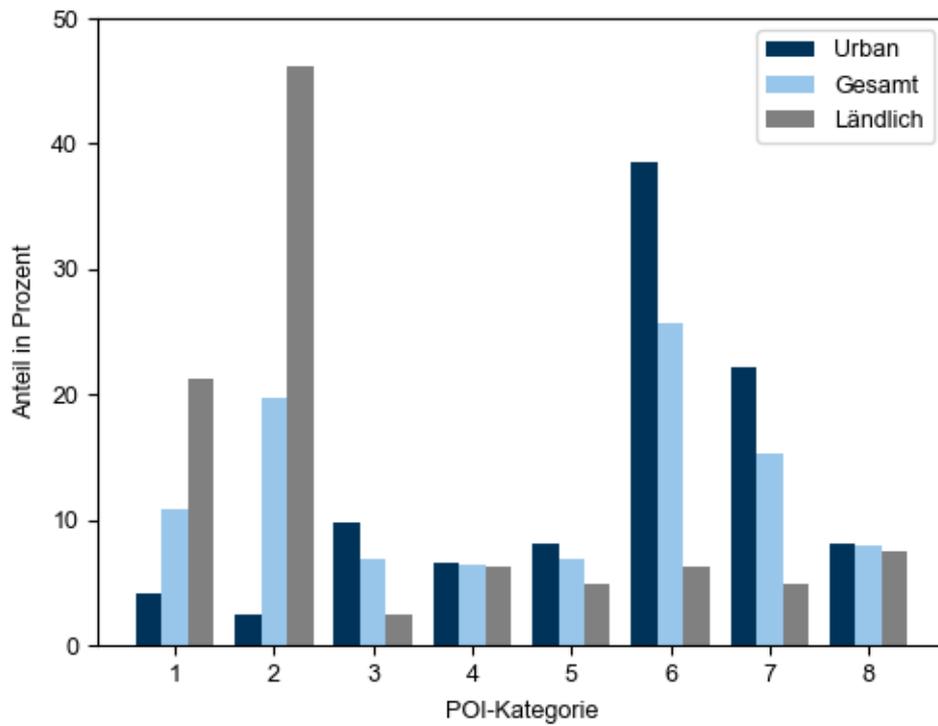


Abbildung 42: POI-Kategorien-Verteilung nach Urbanen und Ländlichen Clustern [26, p. 63]

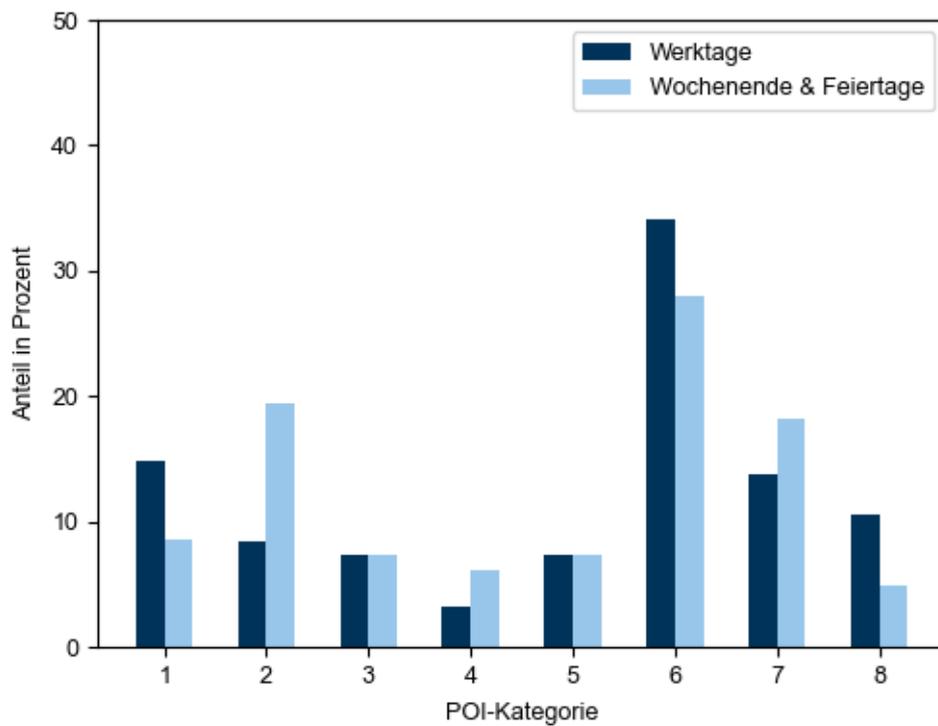


Abbildung 43: POI-Kategorien-Verteilung nach Werktagen sowie Wochenenden & Feiertagen [26, p. 65]

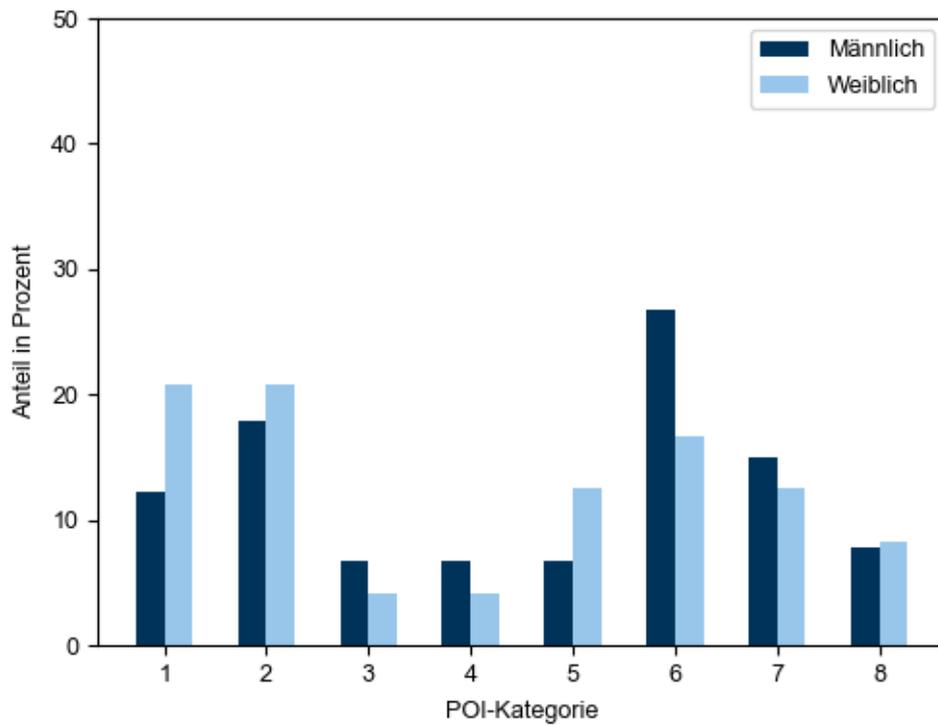


Abbildung 44: POI-Kategorien-Verteilung nach Geschlecht [26, p. 68]

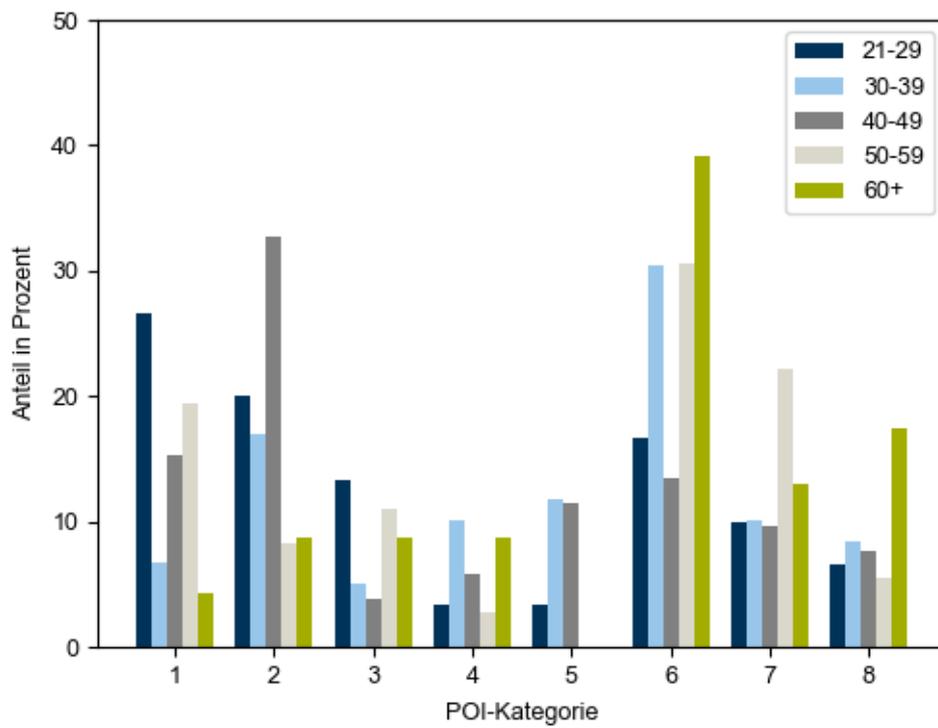


Abbildung 45: POI-Kategorien-Verteilung nach Altersgruppen [26, p. 71]

d) Tankverhalten

In diesem Abschnitt wird das Tankverhalten der BeeZero-Flotte analysiert und dabei neben der räumlich-zeitlichen Verteilung der Tankereignisse auch auf fehlgeschlagene Betankungen („Mehrfachbetankungen“) eingegangen. Am Ende erfolgt die Ableitung von Verbrauchswerten der Fahrzeuge unter realen Bedingungen. Zu beachten ist dabei, dass ausschließlich von BeeZero beauftragte Service-Mitarbeiter die Fahrzeuge betanken durften und es Kunden nicht gestattet war, Tankvorgänge durchzuführen. Die Service-Mitarbeiter waren angehalten, Fahrzeuge, die einen Tankstand von ca. 40% aufwiesen, zu betanken, um für Kunden jederzeit längere Fahrten zu ermöglichen.

Abbildung 46 zeigt die prozentualen Anteile der Tankstopps, die je Tankstellenstandort entfallen. Auffällig ist der große Anteil der Detmoldstraße in München, der aufgrund der späteren Eröffnung der anderen Standorte sowie die besser erreichbare Lage der Detmoldstraße von den Homezones zustande kommt.

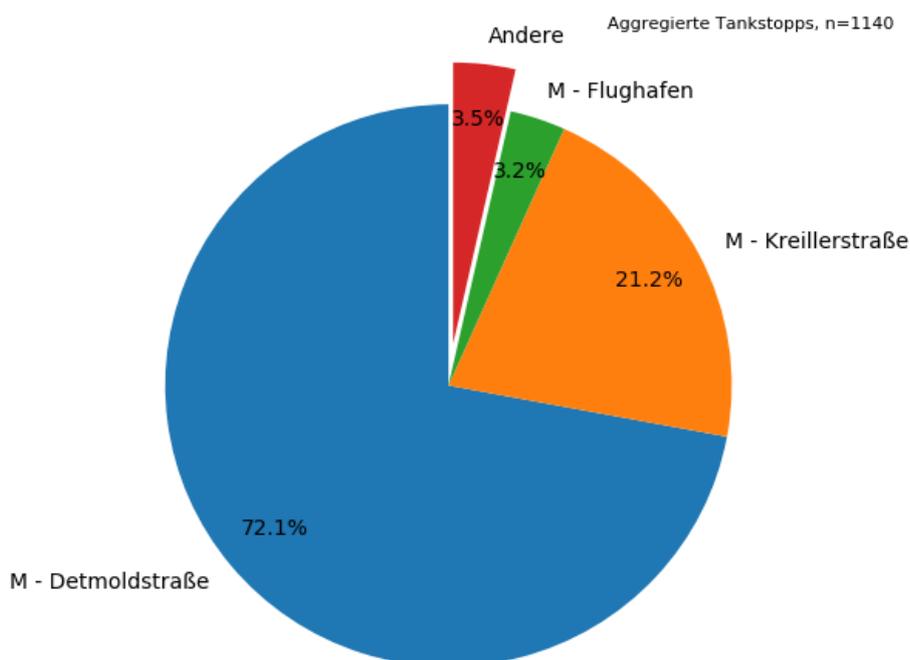


Abbildung 46: Prozentuale Anteile der Tankstopps an den verschiedenen Tankstellenstandorten

Die zeitliche Verteilung von Tankvorgängen nach Wochentagen und nach Uhrzeiten sind in Abbildung 47 und Abbildung 48 dargestellt. Auffällig ist die hohe Betankungsquote an Montagen und an Sonntagen, die auf eine verstärkte Nutzung der Fahrzeuge an Wochenenden hinweist. Während der Woche findet eine gleichverteilte Betankung der Fahrzeuge statt, wohingegen samstags nahezu keine Betankungen stattgefunden haben, um Fahrzeuge für potentielle Wochenendkunden verfügbar zu halten.

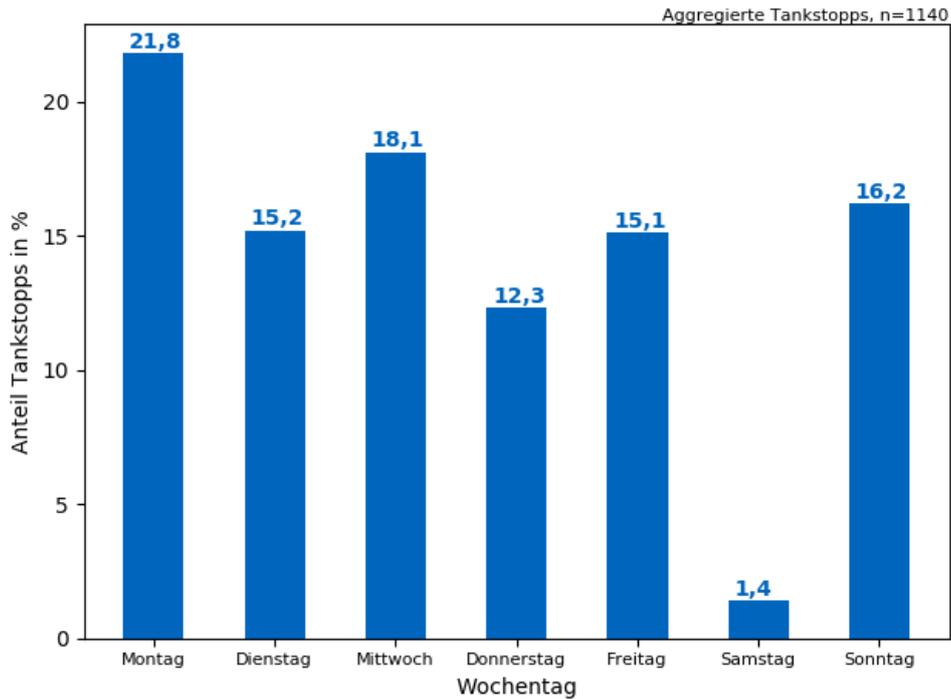


Abbildung 47: Verteilung der Tankstopps aggregiert nach Wochentagen

Die stündliche Verteilung der Tankstopps zeigt einen steilen Anstieg ab 07:00 Uhr morgens, ein leichtes Tief während der Mittagszeit und einen gegen Abend abfallenden Verlauf. Eine leichte Erhöhung in den Abendstunden (19:00 – 20:00 Uhr) weist auf die am Sonntagabend durchgeführten Betankungsvorgänge nach Rückkehr der Kunden hin.

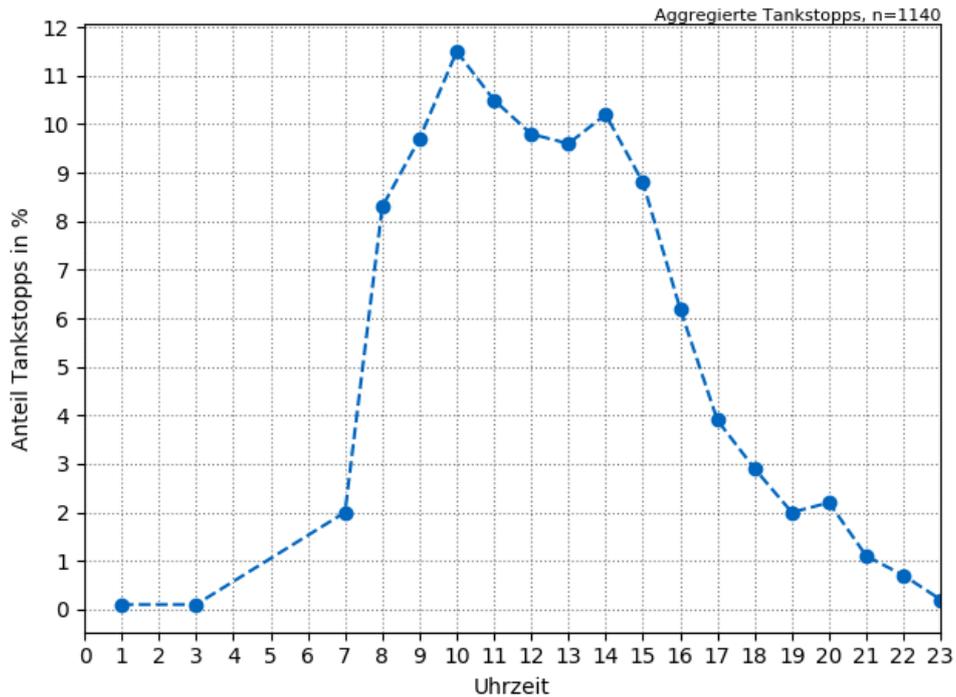


Abbildung 48: Verteilung der Tankstopps aggregiert nach Tageszeiten

Die durch die Service-Mitarbeiter durchgeführten Fahrten führten immer von einer Zone des Geschäftsgebiets zu einer Tankstelle, um anschließend das Fahrzeug in der gleichen oder in einer anderen Zone abzustellen und von dort das nächste Fahrzeug zum Tankvorgang zu bringen. Da die Tankstellenstandorte nicht im Zentrum von München liegen, ist die Länge der Pendelfahrten zu den Tankstellen von Interesse. In Abbildung 49 sind die Fahrstrecken für die beiden Tankstellenstandorte Detmoldstraße und Kreillerstraße dargestellt. In beiden Fällen werden für eine Tankfahrt knapp 20 km zurückgelegt (Hin- und Rückweg).

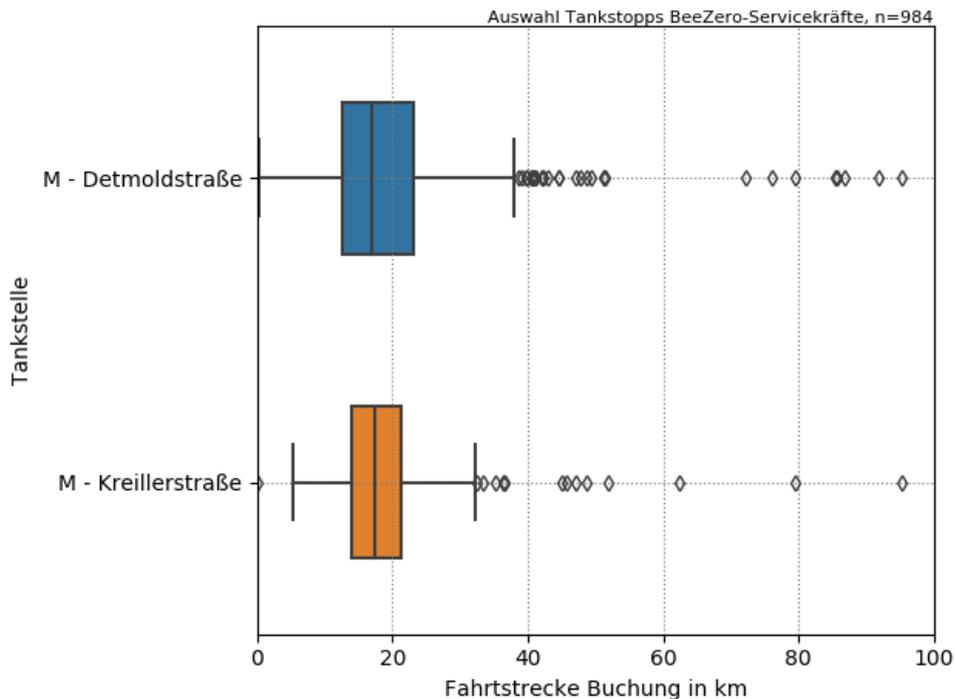


Abbildung 49: Fahrtstrecke von Betankungsvorgängen durch Service-Mitarbeiter

Für die Alltagstauglichkeit von FCEV-Fahrzeugen ist der Tankvorgang ein entscheidendes Kriterium, da dessen Energiedurchsatz deutlich über dem Ladevorgang von BEV liegt und somit eine kürzere Tankdauer bei gleichzeitig größerer Reichweite erreicht werden kann. Um den Tankvorgang näher zu beleuchten, sind in Abbildung 50 die Verteilung der getankten Kraftstoffmengen sowie in Abbildung 51 die Aufenthaltsdauern an der Tankstelle gezeigt. Es zeigt sich, dass bei einem Tankstopp meist mehr als 1,5 kg Wasserstoff getankt wurde, worin sich die Notwendigkeit des Tankstopps manifestiert. Die Aufenthaltszeiten an den Tankstellen lassen sich auf 5 min. bis 10 min. beziffern, wobei auch deutlich längere Tankstopps zustande kamen. Diese entstanden vorzugsweise durch fehlgeschlagene Tankvorgänge, die durch technische Probleme der Tankstellen verursacht wurden. Da die Abdeckung mit Wasserstofftankstellen im Stadtgebiet noch nicht ausreichend ist, kann nicht an einen anderen Standort ausgewichen werden, sofern die Zapfsäulen einer Tankstelle nicht funktionsfähig sind. Die prozentuale Darstellung von Mehrfachbetankungen (technische Probleme der Tankstelle) findet sich in Abbildung 28.

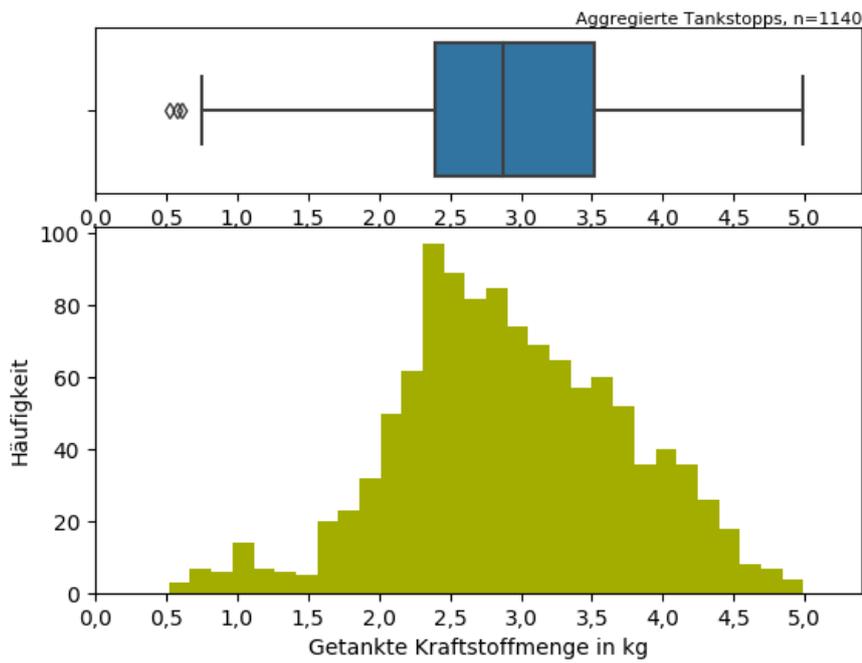


Abbildung 50: Verteilung und Boxplot der getankten Kraftstoffmenge je Tankstopp

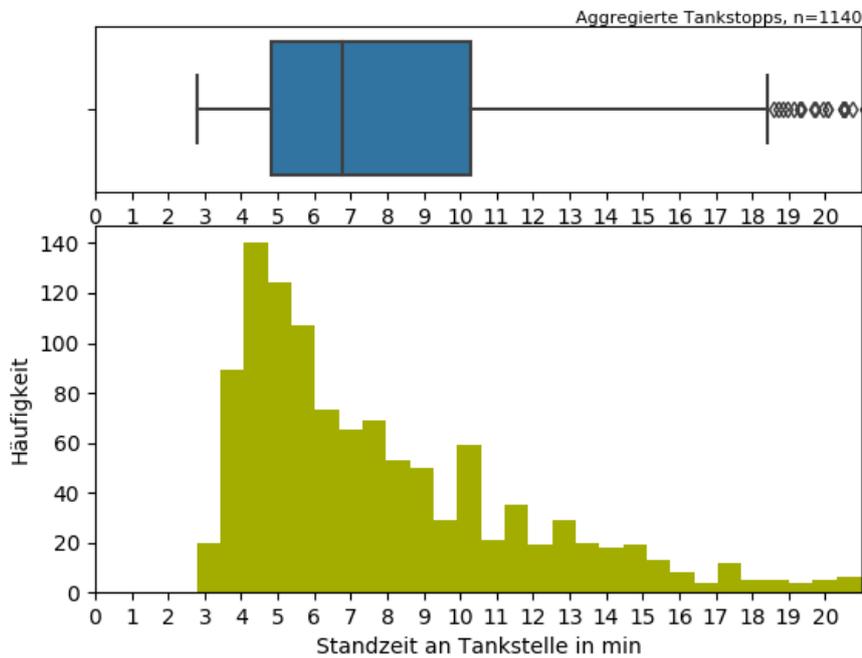


Abbildung 51: Verteilung und Boxplot der Aufenthaltszeit an der Tankstelle je Tankstopp

Die durchschnittlichen Wegstrecken, die zwischen zwei Tankstopps gefahren wurden, belaufen sich auf ca. 200 km, wie Abbildung 52 zu entnehmen ist.

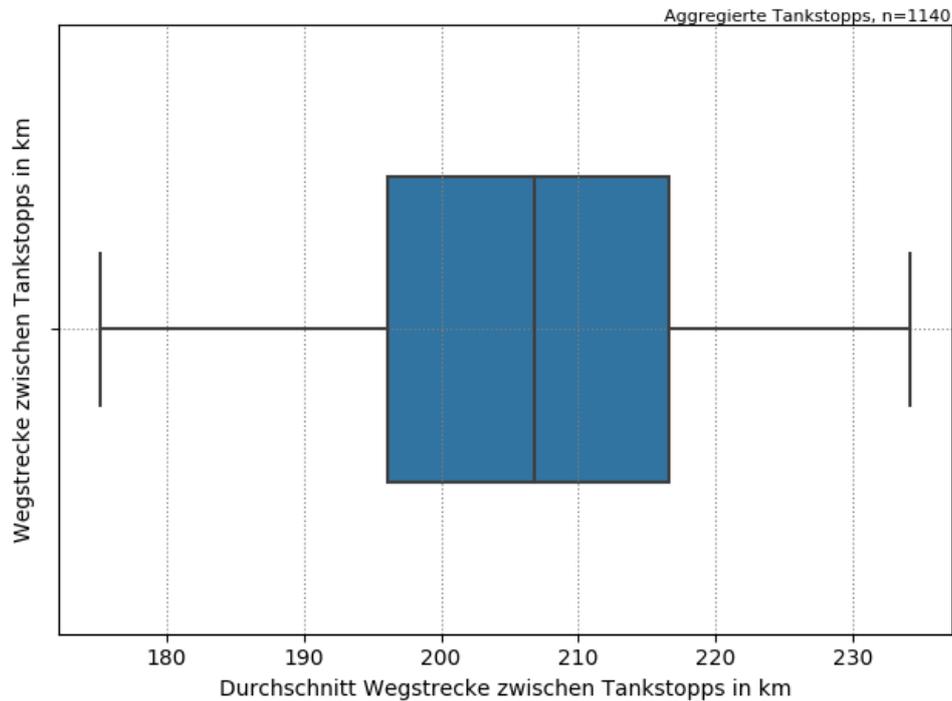


Abbildung 52: Durchschnittliche gefahrene Wegstrecke zwischen zwei Tankstopps

Die gewonnenen Tankdaten wurden in den Analysen mit den Mobilitätsdaten verknüpft und hinsichtlich des Verbrauchsverhalten der FCEV-Fahrzeuge unter Realbedingungen ausgewertet. Das Tankdelta seit dem letzten Tankvorgang verrechnet mit der gefahrenen Strecke ergibt den Verbrauch in $\text{kgH}_2/100 \text{ km}$. Wie Abbildung 53 zu entnehmen, liegt der Verbrauch bei durchschnittlich $1,38 \text{ kgH}_2/100 \text{ km}$. Diese Angabe liegt über den in AP1 ermittelten Verbrauchswerten, die durch den Einfluss des Fahrverhaltens auf den Verbrauch zustande kommen.

Der Kraftstoffverbrauch schwankt, wie in Abbildung 54 dargestellt, über das Jahr verteilt um ca. $0,25 \text{ kgH}_2/100 \text{ km}$ und liegt in den kalten Wintermonaten höher. Es ist anzunehmen, dass der Mehrverbrauch durch den erhöhten Energiebedarf für die Fahrzeugheizung zustande kommt. Ein weiterer möglicher Aspekt kann ein schlechterer Wirkungsgrad der Brennstoffzelle bei niedrigeren Außentemperaturen darstellen.

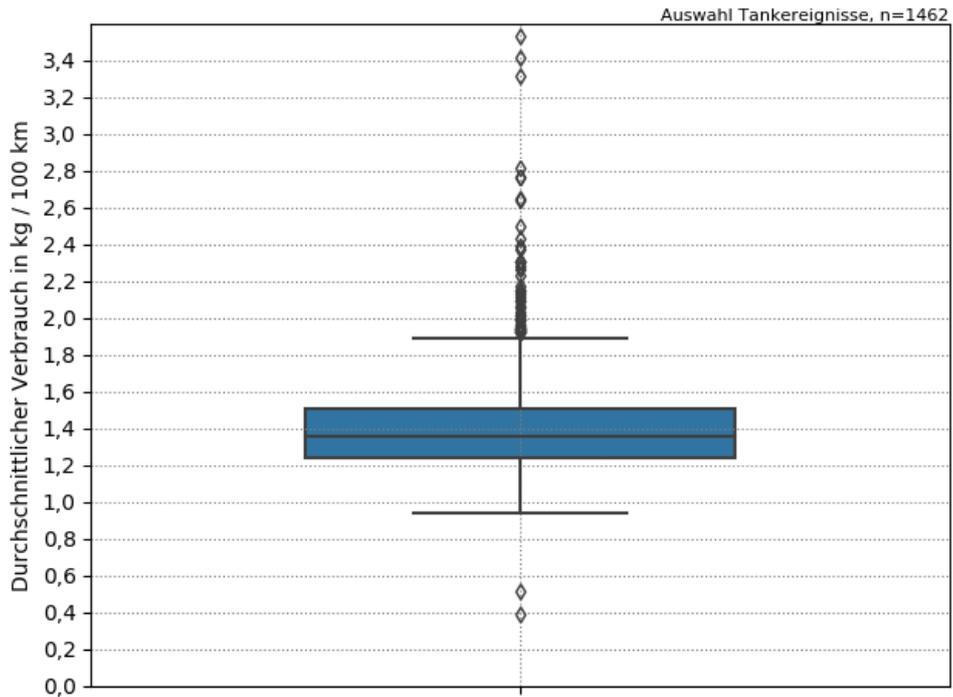


Abbildung 53: Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch der BeeZero-Flotte im Carsharing-Einsatz

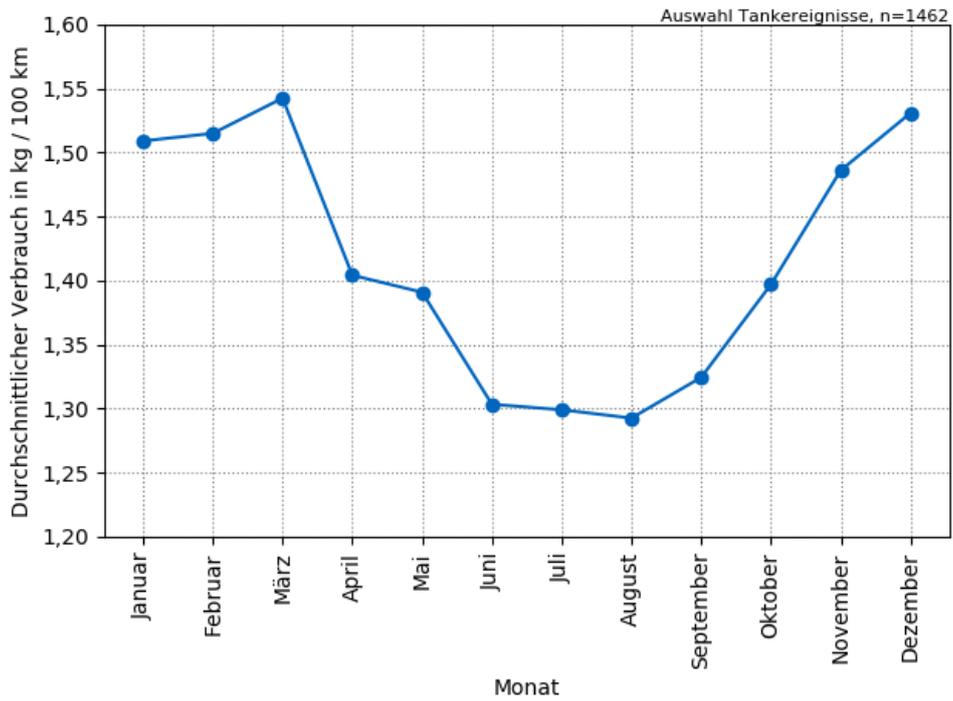


Abbildung 54: Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch der BeeZero-Flotte im Carsharing-Einsatz aggregiert nach Monaten

2) AP 3.2: Analyse räumlich/zeitlicher Einflussfaktoren auf das Mobilitätsverhalten (TUM)

Unter räumlich/zeitlichen Einflussfaktoren sind für den vorliegenden Bericht (unregelmäßige) Ereignisse zu verstehen, die das Mobilitätsverhalten beeinflussen und dieses von regelmäßigen Mustern abweichen lassen. Diese Anomalien können bspw. durch äußere Einflüsse wie Wetter oder Veranstaltungen hervorgerufen werden. Um die Einflussfaktoren identifizieren zu können, ist zunächst eine Erfassung des regelmäßigen Mobilitätsverhaltens erforderlich.

Berücksichtigt man alle Kundenbuchungen des Beezero Carsharing-Konzeptes, so sind dies pro Tag nur Wenige, sodass keine Aussagen hinsichtlich der zeitlichen Einflussfaktoren möglich sind. Dasselbe gilt für die räumlichen Einflussfaktoren, da auf einzelne Gebietszellen im Großraum München bzw. je Zone zu wenige Buchungen entfallen, um Aussagen zu Anomalien über das regelmäßigen Mobilitätsverhalten hinaus zu erfassen.

Aus den genannten Gründen ist eine Detektion von Anomalien im räumlich/zeitlichen Mobilitätsverhalten mit dem vorliegenden Datensatz nicht möglich. Bei der Analyse des Datensatzes werden daher ausschließlich aggregierte räumliche und zeitliche Subsets (z.B. Zonen/POI-Kategorien, Wochentage/Wochenende) betrachtet.

3) AP 3.3: Modellierung des Gesamtsystems in einer agenten-basierten Simulationsumgebung (TUM)

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung und Implementierung eines agenten-basierten Simulationsmodells beschrieben, mit welchem das BeeZero-Car-Sharing-System nachgebildet werden soll. Zweck des Modells ist eine verbesserte Analyse historischer Buchungsdaten sowie eine Evaluation des Car-Sharing-Services in verschiedenen Szenarien. Die Simulation wird unter anderem dazu verwendet, Rückschlüsse auf die Laufwege der Benutzer bei vergangenen Buchungen zu ziehen, wenn diese zum Car-Sharing-Fahrzeug gehen bzw. von dem Fahrzeug nach Hause gehen. Ähnlich zu der Studie von Schmöller et al. [27] sind keine Informationen zu den Laufwegen in den historischen Buchungsdaten vorhanden. Neben der retrospektiven Analyse soll die Simulation auch dazu verwendet werden, um das Potential des Car-Sharing-Services in zukünftigen Szenarien mit höherer Nachfrage zu untersuchen.

Zunächst wird die Entwicklung und die Funktionalität des Simulationsmodells beschrieben. Folgend wird die Aufbereitung der historischen Buchungsdaten des BeeZero-Datensatzes erläutert. Diese Daten werden für die Verwendung und Validierung mit der Simulation verwendet. Abschließend wird die Validierung des Simulationsmodells dargestellt.

Aufbau des agenten-basierten Simulationsmodells

Für die Simulation des Car-Sharing-Systems wird eine agenten-basierte Simulation mit diskreten Events gewählt. Die Simulation ist in JAVA geschrieben und von der Simulation in [28] abgeleitet. Die Simulation erlaubt eine detaillierte Simulation mehrerer Entitäten bei schneller Ausführungszeit. Die Simulation enthält verschiedene Agenten-Klassen mit denen die Kunden, die Car-Sharing-Fahrzeuge, sowie das Service-Personal abgebildet werden. Die Wasserstoff-Tankstellen sind als stationäre

Agenten modelliert. Eine Event-Liste (Queue) enthält sämtliche Events sortiert in zeitlicher Reihenfolge und wird solange in einer Schleife durchlaufen, bis alle Events abgearbeitet wurden. Zusätzliche Module beinhalten Funktionen, welche von der Simulation verwendet werden. Die Graphhopper Routing Engine [29] wird eingesetzt, um Geh- sowie Fahrrouten anhand von Open Street Map Daten der Stadt München zu berechnen. Die Ergebnis-Daten werden in einer SQLite-Datenbank für weitere Bearbeitung und Analyse gespeichert. Die Simulation des Car-Sharing-Systems benötigt fünf Eingang-Dateien welche in Tabelle 15 aufgelistet sind.

Tabelle 15: Simulation Eingangsdaten

Eingangs-Datei	Beschreibung
Buchungen	Liste aller Buchungs-Anfragen für die Ausleihe eines Car-Sharing-Fahrzeugs. Jede Anfrage enthält eine User-ID, die Heim-Position des Users sowie einen Zeitstempel für die Reservierung, den Beginn und das Ende einer Buchung. Zudem ist die zurückgelegte Fahrtstrecke der Buchung enthalten.
Homezones	Informationen zu der geometrischen Form und Lage der Gebiete, in denen die Fahrzeuge geparkt werden.
Fahrzeuge	Zuordnung jedes Fahrzeugs zu einer Homezone sowie die initiale Position aller 50 Fahrzeuge.
H ₂ -Stationen	Positionen aller verfügbaren H ₂ -Stationen, an denen die Fahrzeuge wieder aufgetankt werden können.
Service Personal	Liste, welche die Anzahl und die initiale Position der Servicekräfte definiert, welche die Fahrzeuge auftanken, wenn diese einen niedrigen Füllstand aufweisen.

Nach dem Einlesen der Eingangs-Daten und dem Startvorgang der Simulation werden die Buchungen in chronologischer Reihenfolge des Reservierungs-Zeitpunktes bearbeitet. Zum Zeitpunkt einer Reservierung sucht der Benutzer-Agent nach einem verfügbaren Fahrzeug in seiner Umgebung (Abbildung 55 gestrichelte Linie) und reserviert das Fahrzeug. Damit wird vermieden, dass das Fahrzeug nicht mehr verfügbar ist, wenn die Person bei der Position des Fahrzeugs eintrifft. BeeZero erlaubt eine kostenfreie Reservierung eines Fahrzeugs für bis zu 60 Minuten. Der Füllstand des Fahrzeugs wird bei der Suche berücksichtigt, da den Benutzern ein selbstständiges Betanken der Fahrzeuge nicht gestattet ist. Ebenfalls wird der Laufweg zu dem Fahrzeug betrachtet. Schmöller et al. [27] und Becker et al. [30] nehmen an, dass Laufwege bis zu 400 m für den Benutzer annehmbar sind, da dieser Wert von Laufdistanzen zu Stationen des ÖPNV abgeleitet sind. Eine Studie von Kumar und Bierlaire [31] zu Car-Sharing in Nizza kommt zu der Erkenntnis, dass ca. 20 % der Nutzer zwischen 500 m und 1.5 km laufen, um zu dem Fahrzeug zu gelangen. Daher wird der maximale Suchradius in der Simulation auf 1500 m festgesetzt. Falls kein verfügbares Fahrzeug gefunden werden kann, wiederholt die Person die Suche in einem Intervall von einer Minute für den Zeitraum von 30 Minuten.

Falls nach 30 Minuten noch immer kein Fahrzeug gefunden wurde, schlägt die Buchung fehl und wird für statistische Auswertungen in der Datenbank gespeichert.

Nach einer erfolgreichen Buchung wird die Dauer für die Laufstrecke zum Fahrzeug berechnet und ein neues Event in die Event-Liste eingetragen, zu welchem die Person ihre aktuelle Position verlassen muss, um zum Fahrzeug zu gelangen (Abbildung 55 durchgezogene Linie). Nach der Ankunft am Fahrzeug ist das Fahrzeug für die Dauer der ursprünglichen Buchung nicht für andere Agenten sichtbar (Abbildung 55 gepunktete Linie), da das Fahrzeug von der Person bewegt wird. Am Ende der Buchung kehren der Nutzer und das Fahrzeug zu einem Punkt in der Nähe des Ursprungs des Nutzers zurück. Gleichzeitig wird der Wasserstoff-Verbrauch anhand der zurückgelegten Wegstrecke berechnet. Für die Berechnung wird ein durchschnittlicher Verbrauch von 1,78 kg/100 km verwendet, welcher von dem Verbrauch der realen Car-Sharing Flotte im betrachteten Zeitraum abgeleitet ist. Weiter werden die fälligen Kosten für die Buchung anhand des BeeZero-Preisschemas berechnet. Nach der Rückgabe des Fahrzeugs werden die Distanz und die Dauer berechnet, welche der Nutzer benötigt, um zurück zu seinem Ursprung zu gelangen. Die Simulation der Buchung ist abgeschlossen sobald der Nutzer seinen Fußweg beendet hat und Statistiken zu Lauf- und Fahrdistanzen werden in die SQLite-Datenbank gespeichert.

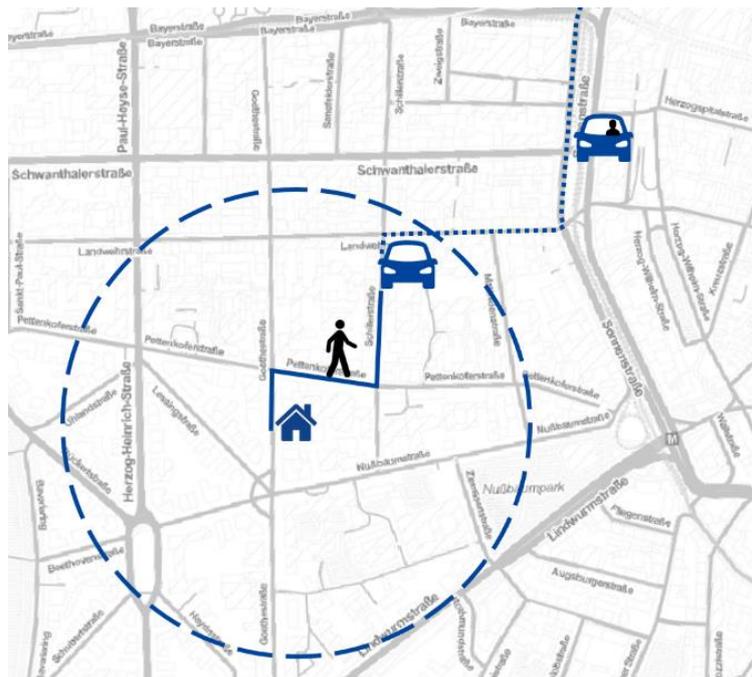


Abbildung 55: Darstellung des Buchungsprozesses eines Car-Sharing-Fahrzeugs. Such-Radius (gestrichelte Linie), Laufweg (durchgezogene Linie) und Fahrt (gepunktete Linie).

Während der Simulation überwacht eine konfigurierbare Anzahl an Service-Agenten den Füllstand der Car-Sharing Fahrzeuge, um diese aufzufüllen, sobald der Tankstand unter einen Füllstand von 50 % fällt. In der Simulation wird für die Suche alle 10 Minuten ein „Such-Event“ zwischen 7:00 Uhr und 18:00 Uhr geplant. Falls ein Fahrzeug mit niedrigem Tankstand gefunden wird, fährt ein Service-Agent zu dem Fahrzeug, um mit diesem zur nächstgelegenen Wasserstoff-Station zu fahren. An der Wasserstoff-Station wird die benötigte Zeit für den Auffüllvorgang in Abhängigkeit des

Füllstands berechnet. Falls die Wasserstoff-Tankstelle durch einen anderen Service-Agenten blockiert ist, wartet der Service-Agent und überprüft minütlich die Verfügbarkeit der Tankstelle. Nach erfolgter Betankung wird das Fahrzeug an die ursprüngliche Position zurückgebracht. Falls ein Fahrzeug nach einer Fahrt von einem Kunden einen niedrigen Tankstand aufweist, wird das Service Personal umgehend darüber informiert dieses Fahrzeug aufzutanken.

Der Status und die Position aller Personen-, Fahrzeug- und Service-Agent werden regelmäßig während der Simulation in der Datenbank für eine nachfolgende Analyse gespeichert. Abbildung 56 stellt eine Übersicht über das Simulationsmodell dar und enthält Details zur Event-Logik der Personen- und Service-Agenten ("EventPerson" und "EventService").

Aufbereitung des BeeZero-Datensatzes

Jede Buchung des BeeZero-Datensatzes enthält einen anonymisierten User-Hash, die Fahrzeugidentifikationsnummer (VIN), den Zeitpunkt und die Position vom Start- und Endpunkt der Buchung als auch die Dauer, zurückgelegte Distanz und die Kosten der Buchung. Für die Verwendung der Buchungen als Eingangsdatei für die Simulation wurde der Datensatz zunächst nach validen Einträgen normaler Benutzer gefiltert. Für den Zeitraum vom 04.12.2017 bis 07.01.2018 wurden insgesamt 394 gültige Kundenbuchungen extrahiert, welche für die Validierung des Simulationsmodells eingesetzt werden. Um die Laufwege der Nutzer zu den Fahrzeugen simulieren zu können, ist es notwendig, dass für jede Buchung eine „Home-Location“ generiert wird.

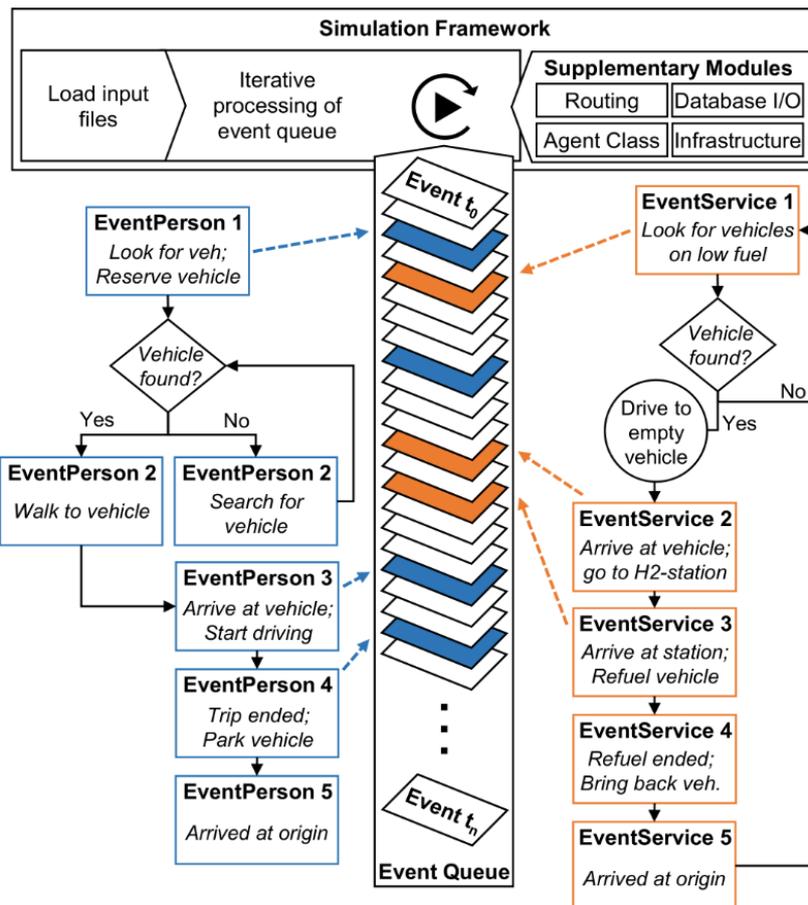


Abbildung 56: Überblick über das Simulationsmodell und Details zu den Events der Personen- (blau) und Service-Agenten (orange).

In Abhängigkeit der Anzahl der durchgeführten Fahrten pro Nutzer wird die Ursprungs-Position nach verschiedenen Schemata gebildet:

- Falls ein Nutzer mehrere Buchungen durchgeführt hat, wird die Home-Position als Durchschnitt der Stop-Positionen der Buchungen berechnet (Abbildung 57 links).
- Falls für einen Nutzer nur eine Buchung vorliegt, wird die Home-Position zufällig in einem Radius von 150 m um die Stop-Position der Buchung generiert. Dies geschieht auf der Annahme, dass eine Person im Allgemeinen so nahe wie möglich an seinem finalen Zielpunkt parken möchte (Abbildung 57 rechts). Dieses Vorgehen wird auch angewendet, wenn eine Person mehrere Buchungen durchgeführt hat, jedoch stets in verschiedenen Zonen.



Abbildung 57: Generierung der Home-Position (rotes Symbol) falls mehrere Fahrten von einem Nutzer durchgeführt wurden (links) oder falls nur eine Fahrt durchgeführt wurde (rechts). Die Pfeile in lila zeigen von dem Start-Punkt einer Buchung zu dem End-Punkt der Buchung

Falls verfügbar werden während der Generation der Home-Position Informationen zu dem Postleitzahl-Gebiet eines Nutzers mitberücksichtigt.

Für die Erstellung der Eingangsdaten zur Flotte der Car-Sharing Fahrzeuge werden historische Positionsdaten der 50 Fahrzeuge in dem Untersuchungszeitraum analysiert, um die Anzahl der Fahrzeuge je Homezone zu ermitteln. Jedem der 50 Fahrzeuge wird daraufhin eine der 21 Zonen sowie eine zufällig generierte Position innerhalb dieser Zone zugeordnet.

Validierung der Car-Sharing-Simulation

Die aufbereiteten BeeZero-Buchungsdaten werden als Eingangsdaten für das Simulationsmodell verwendet. Das Simulationsmodell wird durch den Vergleich der Buchungsdaten mit den Ergebnissen der Simulation validiert. Zusätzlich werden Informationen zu den Laufwegen der Nutzer zu/von den Fahrzeugen und zu der Anzahl an Tankvorgängen gewonnen.

Von 394 Buchungen des originalen Datensatzes können in der Simulation 374 Fahrten erfolgreich durchgeführt werden. Von den 20 fehlgeschlagenen Buchungen können vier Fahrten nicht durchgeführt werden, da die verbleibende Reichweite der Fahrzeuge zum Buchungszeitpunkt nicht ausreichend ist. Drei dieser Fahrten weisen jedoch eine Länge zwischen 431 km und 1395 km auf und wären nur möglich, wenn der Fahrer unterwegs auftanken kann und werden von der Simulation nicht abgebildet. Die weiteren 16 Fahrten schlagen fehl, da kein Fahrzeug in der Umgebung gefunden werden kann. In diesen Fällen ist das nächste verfügbare Fahrzeug durchschnittlich 3 km entfernt.

Von den 374 erfolgreich durchgeführten Buchungen wurde der Preis korrekt von dem Simulationsmodell berechnet, inklusive der korrekten Anwendung von Preispaketen nach dem „Best-Price“-Schema. Abbildung 58 zeigt die Verteilung der Laufdistanzen.

Die durchschnittliche Distanz zu einem Fahrzeug beträgt 357 m und durchschnittlich 252 m, um zurück nach Hause zu laufen.

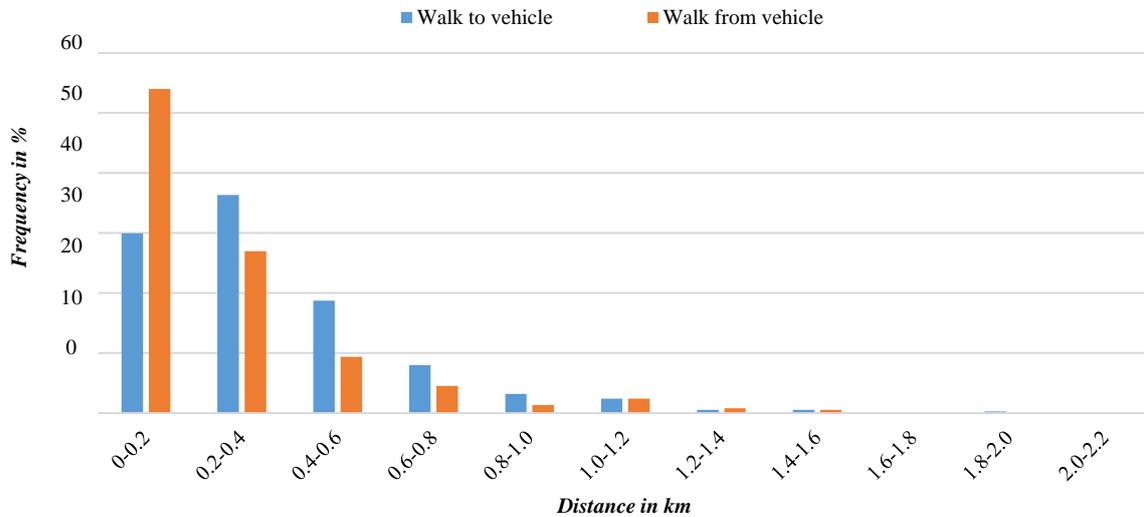


Abbildung 58: Verteilung der Laufdistanzen zu und von den Car-Sharing Fahrzeugen als Ergebnis der Simulation

In diesem Szenario wurden 58 Tankfahrten von einer Servicekraft durchgeführt. Im Durchschnitt wurden 68 % des Tankvolumens aufgefüllt. Die visuelle Überprüfung der Lauf- und Fahrwege bestätigt eine korrekte Berechnung der Routen. Basierend auf der akkuraten Nachbildung der Buchungen, wird eine valide Funktion der Simulation angenommen.

4) AP 3.4: Optimierung des Carsharing-Konzepts (TUM)

Für eine Optimierung des BeeZero-Car-Sharing-Konzeptes wird eine Nachfrage-Eingangsdatei auf Basis der Verkehrs-Umfrage „Mobilität in Deutschland 2008“ [32] gebildet. Der Datensatz ermöglicht eine Darstellung der Wege der Münchener Bevölkerung und wird dazu verwendet, um die Kapazität des Car-Sharing-Systems zu untersuchen sowie um Hinweise zur Erweiterung des Geschäftsgebietes abzuleiten.

Zunächst wird die Erstellung der Münchener Verkehrsnachfrage beschrieben, die als Eingangsdatei für die nachfolgende Simulation verwendet wird. Abschließend werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

Erstellung des Datensatzes zur Münchner Verkehrsnachfrage

Ziel des Simulationsmodells ist, das Verhalten des Car-Sharing-Systems bei zusätzlicher Nachfrage zu untersuchen. Zu diesem Zweck werden Daten der Verkehrsumfrage der Bevölkerung von Deutschland und München aus dem Jahre 2008 herangezogen [32]. Der Datensatz für das Gebiet des Münchener Verkehrsverbunds (MVV) beinhaltet 5895 Haushalte mit 13.136 befragten Personen und über 40.000 erfassten Wegen [33]. Für diese Untersuchung wird nur die Population des Münchener Stadtgebietes berücksichtigt, da der BeeZero-Car-Sharing-Service nur im Münchner Stadtgebiet zur Verfügung steht. Diese Untermenge beinhaltet 7.468

befragte Personen aus 3561 von insgesamt 1,26 Millionen Haushalten. Die Anzahl der von den befragten Personen zurückgelegten Wege beträgt 23.505. Die Personen in der Umfrage sind anonymisiert und deren Position ist verschleiert, indem jeweils nur die Position der Straße bzw. der Mittelpunkt eines Postleitzahlengebiets angegeben ist. Diese Information ist jedoch ausreichend, um ein repräsentatives Verkehrsnachfragemodell basierend auf den Stadtbezirken von München umsetzen zu können.

Die in der Umfrage erfassten Daten sind in verschiedene Datensätze aufgeteilt, welche entweder Informationen zu den zurückgelegten Wegen, den befragten Haushalten oder Personen enthalten. Die Datensätze und ein Auszug der darin enthaltenen Daten sind in Tabelle 16 aufgeführt. Um ein valides Nachfragemodell zu erstellen ist eine Zusammenführung, Gewichtung und Hochrechnung der Datensätze erforderlich.

Tabelle 16: Datensätze für die Modellierung der Verkehrsnachfrage der Münchner Population

Datensatz	Inhalt (Auszug)
a) Wege mit verschleierter Positionsangabe	<ul style="list-style-type: none"> • Wege der Verkehrsumfrage des MVV-Gebiets • Angaben zu Longitude/Latitude der Start- und Endpunkte eines Weges • Kennung des Kreises in dem ein Weg begann/endete • Typ des Starts/Ziels (z.B. zu Hause, Arbeit etc.) • Haushalt-/Personen-ID
b) Haushalte	<ul style="list-style-type: none"> • Haushalt-ID nur von Münchener Haushalten
c) Personen	<ul style="list-style-type: none"> • Münchner Einwohner • Haushalts-ID • Informationen zur Fahrerlaubnis
d) Wege ohne Positionsangabe	<ul style="list-style-type: none"> • Wege der Münchner Bevölkerung • Haushalt-/Personen-ID • Gewichtungsfaktor g_{trip} • Datum/Zeit des Weges • Verkehrsmittel • Verkehrszweck

Da die Personen für die Befragung zufällig aus dem Personenregister gewählt wurden, sind Haushalte mit weniger Personen statistisch unterrepräsentiert [34]. Daher sind im Datensatz Gewichtungsfaktoren für jeden Haushalt, jede Person und jeden Weg gegeben, welche für eine korrekte Berechnung der Gesamtheit aller Wege berücksichtigt werden müssen. Die verfügbaren Gewichtungsfaktoren beziehen sich nur auf das gesamte Münchner Stadtgebiet, weswegen eine zusätzliche Gewichtung auf Basis der 25 Stadtbezirke von München durchgeführt wird. Das Vorgehen ist im Folgenden beschrieben:

1. Identifikation der Position der Haushalte: Die 42.074 Wege des MVV-Gebietes sind im Datensatz A enthalten. Die Wege werden daraufhin untersucht, ob deren Start oder Ziel als „zu Hause“ markiert ist. Zusammen mit der Information zu der Haushalt-ID kann den 5.254 Haushalten eine Position zugewiesen werden.
2. Filtern von Münchner Haushalten: Unter Berücksichtigung von Datensatz B werden die Informationen zu den Haushalten mit Position gefiltert, sodass der Datensatz nur Haushalte des Münchner Stadtgebiets enthält. Dieser Datensatz enthält 3.141 Haushalte mit Positionsangaben.
3. Personen zu Stadtbezirken zuordnen: Anhand der Haushalt-Position und der Haushalt-ID kann jede Person aus Datensatz C einem Stadtbezirk zugeordnet werden. Mit dem Gewichtungsfaktor der Personen kann die Anzahl an Personen pro Stadtbezirk ermittelt und mit den offiziellen Angaben der Stadt [35] verglichen werden. Der Gewichtungsfaktor $g_{district}$ wird für jeden Bezirk errechnet, um die korrekte Verteilung der Personen und Wege auf die Stadtbezirke herzustellen.
4. Zusammenstellung der Wege der Münchener Bevölkerung: 23.505 Wege, welche von der Münchner Bevölkerung zurückgelegt wurden, werden aus Datensatz A extrahiert und um Informationen aus Datensatz D zu Datum/Zeit, Verkehrsmittel und Wegezweck ergänzt.
5. Berechnung der Korrektur- und Hochrechnungsfaktoren: Von 23.505 Wegen verfügen nur 14.348 Wege über eine gültige Position- und Datumsangabe. Daher wird der Korrekturfaktor k_1 berechnet:

$$k_1 = \frac{23,505 \text{ Wege}}{14,348 \text{ Wege}} = 1.6382 \quad (1)$$

Weiterhin haben 508 von allen 7.468 befragten Münchner Personen keine Informationen zu ihren Wegen angegeben. Auf der Annahme, dass deren Reiseverhalten dem des durchschnittlichen Reiseverhaltens entspricht, wird der Korrekturfaktor k_2 nach [34] folgendermaßen berechnet:

$$k_2 = \frac{7,468 \text{ Personen}}{6,962 \text{ Personen}} = 1.0727 \quad (2)$$

Der Hochrechnungsfaktor h wird durch den Quotienten der Bevölkerungszahl Münchens von 1.200.000 [33] geteilt durch die Anzahl der befragten Personen ermittelt:

$$h = \frac{1,260,000 \text{ Personen}}{7,468 \text{ Personen}} = 168.7199 \quad (3)$$

6. Erstellung der vollständigen Verkehrsnachfrage: Jeder der 14.348 Wege mit Position- und Zeitangaben wird mit den in den vorangegangenen Schritten bestimmten Gewichtungs-, Korrektur- und Hochrechnungsfaktoren multipliziert. Für jeden Weg wird der Gesamtfaktor f_{total} bestimmt als:

$$f_{total} = g_{trip} g_{district} k_1 k_2 h \quad (4)$$

Anhand des in [34] dargestellten Vorgehens werden zwei Datensätze erstellt. Ein Datensatz repräsentiert die Verkehrsnachfrage an einem durchschnittlichen Wochentag (Montag-Freitag) und enthält 4.772.253 Wege. Der zweite Datensatz enthält Wege, welche an einem Samstag (4.129.548) und Sonntag (2.488.498) zurückgelegt wurden. Das Ergebnis wird mit den veröffentlichten Berichten [33], [36] verglichen und bestätigt ein korrektes Vorgehen. Während der Erstellung der vollständigen Verkehrsnachfrage werden die Position sowie der Zeitstempel für jede Vervielfachung eines Weges randomisiert, um eine unrealistische Anhäufung von Wegen an einem Ort oder zu einem Zeitpunkt zu vermeiden. Für die Position wird ein zufälliger Punkt innerhalb des entsprechenden Stadtbezirks gewählt, wobei berücksichtigt wird, dass der Punkt in einem Wohn- bzw. Geschäftsgebiet liegt. Die Zeitstempel werden zufällig in einem Bereich $\pm 7,5$ Minuten verschoben.

7. Auswahl relevanter Wege für das BeeZero-Car-Sharing: Da der generierte Datensatz sämtliche Arten von Wegen der Münchener Population enthält, werden für die Simulation nur Wege berücksichtigt, welche für das BeeZero-Car-Sharing relevant sind. Daher werden nur Wege ausgewählt, bei denen die Person einen Führerschein hat. Zusätzlich werden Wege, die zu Fuß, mit dem Fahrrad, Motorrad oder LKW zurückgelegt wurden, entfernt. Auch Wege mit dem Zweck zur Arbeit oder zur Ausbildungsstätte werden nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass für regelmäßige Pendelfahrten eine kostengünstigere Verkehrsalternative zum Car-Sharing gewählt wird (z.B. ÖPNV). Der verbleibende Datensatz enthält 1.273.238 Wege für einen durchschnittlichen Werktag, 1.627.636 Wege für einen Samstag und 925.791 Wege für einen Sonntag. Tabelle 17 zeigt einen Überblick über die durchschnittliche Wegedistanz und die Verteilung der Transportmittel und der Wegzwecke.

Tabelle 17: Analyse des Extrahierten Datensatzes

	Wochentag	Samstag	Sonntag
Gesamte Wege	1.273.238	1.627.636	925.791
Durchschnittliche Distanz	9,26 km	14,55 km	24,12 km
Verteilung Transportmittel in %			
Pkw (Fahrer)	57,3	49,8	49,6
ÖPNV	32,2	27,9	24,5
Pkw (Beifahrer)	8,9	20,7	23,3
Andere	0,9	0,4	1,6
Taxi	0,4	1,0	0,0
Bahn/Flugzeug/Schiff	0,3	0,2	1,0
Verteilung Wegzweck in %			

	Wochentag	Samstag	Sonntag
Freizeit	35,5	44,7	80,9
Einkaufen	32,7	35,6	2,4
Erledigungen	23,9	12,9	12,1
Begleitung	7,9	6,9	4,5

8. Zusammenfügen von Wegen zu Rund-Wegen: Das BeeZero-Car-Sharing erforderte, dass Nutzer das Fahrzeug in der Homezone wieder abstellen, in der das Fahrzeug ausgeliehen wurde. Daher werden die Wege des Datensatzes zu Rund-Wegen zusammengefügt, sofern die letzte Position eines Weges der Start-Position des folgenden Weges gleicht. Für diese Untersuchung beginnt und endet ein Rundweg immer am Zuhause des Nutzers. Zusätzlich wird eine Reservierungsdauer von 30 Minuten zu jedem Weg hinzugefügt sowie eine randomisierte Stopp-Position analog zu dem bereits beschriebenen Vorgehen. Der finale Datensatz enthält 330.154 Runde-Wege für einen Werktag, sowie 432.552 Rundwege für einen Samstag und 316.616 Rundwege für einen Sonntag. Details zu den Rundwegen sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

Tabelle 18: Statistiken zu den generierten Rundwegen

	Werktag	Samstag	Sonntag
Anzahl Rundwege	330.154	432.552	316.616
Durchschnittliche Distanz	16,67 km	29,43 km	25,30 km
Durchschnittliche Dauer	147 min	175 min	218 min
Durchschnittliche Wege pro Rundweg	2,22	2,21	2,12

Ergebnisse und Diskussion

Mit dem Datensatz mit Rundwegen werden mehrere Simulationen durchgeführt. In Anbetracht der Flottengröße von 50 Fahrzeugen kann nur eine Auswahl des Rundwege-Datensatzes simuliert werden. Der Anteil des Datensatzes wird zwischen 0,0625 % und 3 % für beide Datensätze eines Werktags und einem Wochenende variiert. Die resultierende Anzahl an Rundwegen ist in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Überblick über Rundwege für Simulation

Anteil	Werktag	Samstag	Sonntag
0.065 %	205	263	206
0.125 %	413	549	388
0.25 %	826	1.079	794
0.5 %	1.651	2.159	1.587
1.0 %	3.302	4.234	3.258
2.0 %	6.604	8.673	6.310
3.0 %	9.905	12.869	9.605

Mit diesem Ansatz wird die Anzahl an Buchungen, welche an einem Tag von der Flotte mit 50 Fahrzeugen bedient werden kann, untersucht. Die Simulationen zeigen, dass die Anzahl an abgeschlossenen Buchungen mit der Anzahl der Nachfrage steigt. Wie in Abbildung 59 zu sehen, erreicht die Anzahl an durchgeführten Buchungen eine Sättigung von ca. 230 Rundwegen für einen Wochentag und an Samstagen, auch wenn die Nachfrage noch weiter erhöht wird. Sonntags erreicht die Flotte ihre Sättigung bei ca. 150 durchgeführten Buchungen.

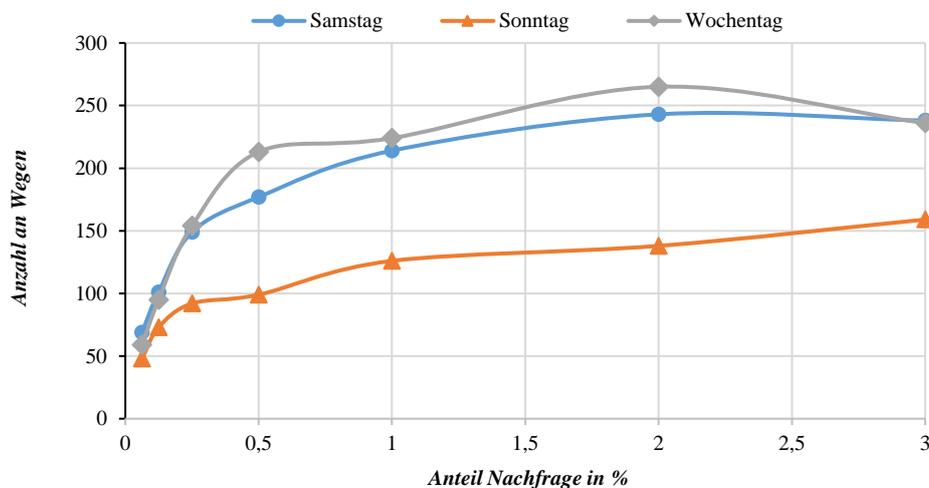


Abbildung 59: Anzahl an durchgeführten Buchungen bei steigender Nachfrage für einen Wochentag, Samstag und Sonntag

Es ist zu beachten, dass die Nachfrage die Kapazität der Flotte deutlich überschreitet. Wie bereits erläutert, enthält der Datensatz die Rundwege aller Münchner Bewohner, welche über das gesamte Stadtgebiet verteilt sind. Daher können nur Buchungen durchgeführt werden, welche sich in Laufradius zu einem Fahrzeug befinden, da der Hinweg zu einem Fahrzeug mit alternativen Transportmitteln (z.B. ÖPNV) in der Simulation nicht implementiert ist. Abbildung 60 zeigt das Ergebnis der Simulation eines Wochentags mit der Auswahl von 3 % aller Rundwege. Das Stadtgebiet von München und die Stadtbezirke (graue Umriss) sowie die BeeZero-Homezones (schwarze Umriss) sind dargestellt. Die grünen Punkte repräsentieren die Home-Position derer Nutzer, welche ihre Buchung durchführen konnten. Es ist ersichtlich,

dass nicht nur Personen innerhalb einer Homezone ihre Buchungen durchführen, sondern auch Benutzer außerhalb des Car-Sharing-Geschäftsgebietes, welche sich in Laufdistanz von 1.500 m (Luftlinie) zu einem Fahrzeug befinden. Die blaue Heatmap stellt die Verteilung aller Buchungen im Stadtgebiet dar und enthält auch Buchungen, welche nicht durchgeführt werden konnten. Diese Ansicht zeigt, dass Gebiete mit hoher Nachfrage nicht von den BeeZero-Homezones abgedeckt sind, insbesondere im Südwesten von München. Gleichzeitig wird sichtbar, dass die Homezones im Südosten des Stadtzentrums nur eine geringe Nachfrage aufweisen.

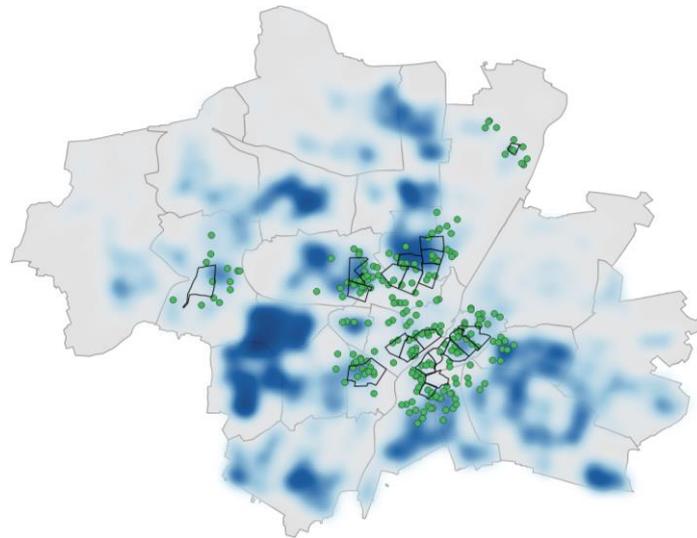


Abbildung 60: Abgeschlossene Buchungen (grüne Punkte) während eines Werktages. Die blaue Heatmap zeigt die Verteilung der gesamten Verkehrsnachfrage. Stadtbezirke sind in grau dargestellt, die Homezones des Car-Sharing-Services in schwarz.

Abbildung 61 zeigt das Simulationsergebnis eines Wochenendes mit 3 % der Verkehrsnachfrage. Es wird erneut sichtbar, dass Nutzer außerhalb der Homezones ihre Buchungen durchführen können. In diesem Szenario weisen 40 % der Rundwege eine Distanz von weniger als 5,7 km auf. Insbesondere Bürger, welche im Stadtzentrum wohnen, haben kürzere Rundwege als Personen in den umliegenden Gebieten des Zentrums. Dies wird anhand der roten Heatmap in Abbildung 61 deutlich, welche den Ursprung der Personen anzeigt, von denen der Rundweg kürzer als 5,7 km lang ist, während die grüne Heatmap die Gebiete veranschaulicht, wo die Rundwege der Personen eine Länge von über 5,7 km aufweisen.

Der aus der öffentlichen Verkehrsumfrage aufgebaute Datensatz erlaubt eine genaue Repräsentation der Verkehrsnachfrage der Münchner Bevölkerung. Durch die Visualisierung der Gebiete mit höherer Nachfrage können Erweiterungen bzw. Änderungen der BeeZero-Homezones abgeleitet werden. Die Untersuchungen zeigen, dass eine erhöhte Verkehrsnachfrage in dem Stadtgebiet zwischen dem Zentrum und den äußeren Stadtgebieten besteht, wo das Car-Sharing-Angebot auf ein höheres Interesse stoßen könnte. Es muss jedoch beachtet werden, dass die generierte Verkehrsnachfrage auf historischen Daten basiert und nicht die Verfügbarkeit des Car-Sharing-Services berücksichtigt. Daher könnten Gebiete, in denen das Modell nur eine geringe Nachfrage aufzeigt, bereits heute eine höhere Nachfrage aufweisen, welche durch den Car-Sharing-Service induziert wurde.

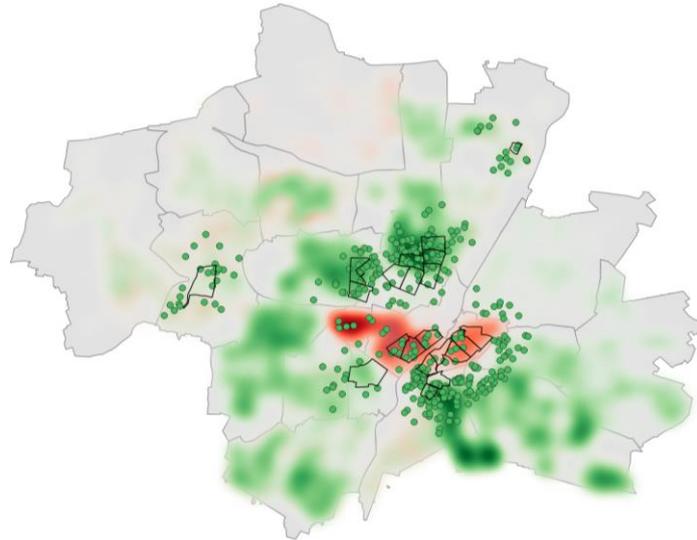


Abbildung 61: Abgeschlossene Buchungen (grüne Punkte) während eines Werktages. Die grüne Heatmap zeigt die Verteilung der Verkehrsnachfrage mit Rundwegen > 5,7 km; die rote Heatmap zeigt die Verteilung der Verkehrsnachfrage mit Rundwegen < 5,7 km. Stadtbezirke sind in grau dargestellt, die Homezones des Car-Sharing Services in schwarz.

Die Analyse der Laufwege in Abbildung 62 zeigt längere Distanzen als in der Simulation mit dem Validierungs-Datensatz in Abbildung 58. Eine Person läuft durchschnittlich 1,32 km, um zu dem Car-Sharing Fahrzeug zu gelangen und 1,04 km, um zurück nach Hause zu kommen. Die längeren Laufwege werden den Nutzern zugeschrieben, welche außerhalb der Homezones wohnen, wie in Abbildung 60 und Abbildung 61 gezeigt. Es ist zudem zu beachten, dass die simulierten Laufdistanzen direkt von dem gewählten Such-Radius von 1.500 m beeinflusst werden. Auch wenn dieser Wert auf Basis einer Literaturrecherche gewählt wurde, ist eine Nutzer-Studie notwendig, welche die akzeptierten Laufdistanzen zu/von einem Car-Sharing-Fahrzeug untersucht und zudem die Bereitschaft der Nutzer ermittelt, inwieweit diese Wege mit alternativen Möglichkeiten (z.B. Fahrrad, ÖPNV) zurückgelegt werden können.

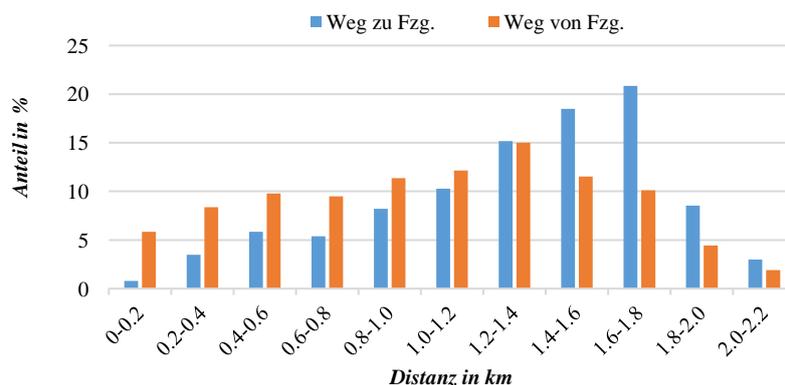


Abbildung 62: Verteilung der simulierten Laufdistanzen zu und von den Car-Sharing-Fahrzeugen an Werktagen und Wochenenden.

Zusätzlich wurde eine Simulation über einen Zeitraum von zwei aufeinanderfolgenden Wochen mit einer Auswahl von 3 % des gesamten Datensatzes durchgeführt, um das Verhalten des Service-Agenten zu untersuchen. Im Durchschnitt werden am Tag 12,8 Tankfahrten durchgeführt mit einer durchschnittlichen Anfahrt von 3,8 km um zu dem

Fahrzeug zu gelangen. Es wurde bestätigt, dass die Anzahl fehlgeschlagener Buchungen über die Simulationsdauer nicht kontinuierlich ansteigt. Dies impliziert, dass für das simulierte Szenario ein Service-Agent ausreichend ist, um die Flotte von 50 Fahrzeugen zu betanken.

Die simulierten durchschnittlichen Kosten pro Kilometer betragen für den Nutzer 1,07 Euro/km. Im Vergleich dazu sind die durchschnittlichen Kosten eines Mittelklasse-Fahrzeugs 0,40 Euro/km, laut ADAC [37].

Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde das Vorgehen zur Modellierung des BeeZero-Car-Sharing-Services in München mit einem agenten-basierten Simulationsmodell beschrieben. Das Modell wurde anhand historischer Buchungsdaten validiert. Zusätzlich konnten mithilfe des Simulationsmodells die Distanzen der Laufwege nachgebildet werden, indem jedem Nutzer eine Position für deren Haus zugewiesen wurde.

Um das Verhalten des BeeZero-Systems bei zusätzlicher Nachfrage zu untersuchen, wurde ein Datensatz auf Basis einer öffentlichen Verkehrsumfrage aus 2008 aufgebaut, welcher die Verkehrsnachfrage in München abbildet. Der Datensatz wurde um Wege bereinigt, welche wahrscheinlich nicht mit dem Car-Sharing-Dienst zurückgelegt werden (z.B. Pendeln zur Arbeit/Schule). Der reduzierte Datensatz wurde weiterbearbeitet, um Rundwege zusammenzustellen, da die Bee-Zero-Fahrzeuge in der gleichen Zone zurückgegeben werden mussten, in welcher diese ausgeliehen wurden. Der Datensatz mit Rundwegen wird als Eingangs-Datei für die Simulation verwendet, um die Leistung des Car-Sharing-Dienstes zu evaluieren. An Werktagen sowie an Samstagen kann die Flotte von 50 Fahrzeugen ca. 230 Fahrten/Tag absolvieren, an Sonntagen können ca. 150 Fahrten/Tag abgeschlossen werden. Die räumliche Analyse zeigt eine Diskrepanz zwischen Gebieten mit hoher Nachfrage und den Geschäftsgebieten von BeeZero. Weiter kann beobachtet werden, dass die Nachfrage im Stadtzentrum vermehrt kürzere Reise-Distanzen aufweist im Vergleich zu den angrenzenden Stadtgebieten. Diese Erkenntnisse suggerieren, dass entweder zusätzliche Geschäftsgebiete bzw. eine Vergrößerung und Verlagerung der Geschäftsgebiete in Gebiete angrenzend an das Stadtzentrum eine höhere Nachfrage bewirken können.

Ausblickend ist jedoch eine Nutzerstudie notwendig, um die simulierten Laufdistanzen der Nutzer und die Bereitschaft der Nutzer für Laufwege zu analysieren und zu validieren. Zusätzliche Simulationen mit veränderten Geschäftsgebieten und anderen Flottengrößen können durchgeführt werden, um die daraus folgenden Effekte und Abhängigkeiten zu untersuchen. In der hier beschriebenen Simulation konnte nur ein Bruchteil der gesamten Nachfrage berücksichtigt werden. Aufgrund der hohen Anzahl der Wege hat Car-Sharing jedoch das Potential, einen bedeutenden Beitrag zu einer nachhaltigen Stadtmobilität zu leisten.

5) AP 3.5: Benchmark Car-Sharing-Konzepte

Als Erstes ist festzuhalten, dass im Verlauf des BeeZero-Projekts verhältnismäßig mehr Buchungen an arbeitsfreien Tagen angetreten werden (49 %) als bei Schmöller et al. (30 %) [27, p. 42]. Aufgrund der großen Diskrepanz ist dieser Trend nicht ausschließlich auf den Effekt von Feiertagen zurückzuführen – die in der Vergleichsstudie vernachlässigt werden –, sondern als charakteristische Eigenschaft des BeeZero-Services zu interpretieren [27, pp. 41-43]. Denn während an Samstagen sowie Sonn- und Feiertagen im Schnitt 3,32 Ausleihen pro Tag erfolgen, werden zwischen Montag und Freitag im Mittel nur 1,64 Fahrzeuge täglich in Anspruch genommen. Dies deckt sich mit der Erkenntnis, dass das BeeZero-Angebot insgesamt häufiger für Freizeitaktivitäten (Kategorie 2: 19,80 %) als für berufliche Verpflichtungen (Kategorie 8: 7,92 %) wahrgenommen wird. Obwohl deutsche Bundesbürger an Wochenenden weniger mobil sind als an Werktagen, ist ein gegensätzliches Erscheinungsbild im Umgang mit dem BeeZero-Dienst zu verzeichnen [38, p. 8]. Als Konsequenz kann eine vermehrte Nutzung der bereitgestellten FCEV für Wochenendausflüge angenommen werden. Sowohl BeeZero als auch der referenzierte Carsharing-Anbieter (München, Berlin) weisen eine junge Kundenstruktur auf, was sich zum Beispiel daran zeigt, dass knapp die Hälfte (45,21 %) aller BeeZero-Buchungen von Personen unter 40 Jahren getätigt wird [27, p. 47]. Insofern spiegelt sich der in diesen Altersklassen sinkende Stellenwert eines privaten Pkw in der Carsharing-Nachfrage wider [27, p. 34].

Die von Klemmer et al. durchgeführte Analyse eines Carsharing-Dienstes in Amsterdam bekräftigt die besondere Bedeutung von Freizeitaktivitäten für derartige Mobilitätskonzepte [39, p. 4]. Auf lang andauernde, außerstädtische Ausflüge wird in diesem Zusammenhang jedoch nicht verwiesen, weil vor allem urbane Ziele wie Museen oder Kinos im Fokus der Studie stehen [39, p. 4]. Diese Tatsache kann somit als weiteres Indiz aufgefasst werden, das die Eignung des BeeZero-Services für ausgedehnte Touren belegt.

Wagner et al. befassen sich in ihrer Forschung mit der Carsharing-Nutzung in Berlin [40, p. 2]. Die entsprechenden Resultate beinhalten unter anderem, dass im Verlauf einer Ausleihe eine durchschnittliche Distanz von acht Kilometern bewältigt wird [40, p. 7]. Verglichen mit den im Mittel pro Buchung zurückgelegten Entfernungen der BeeZero-Zonen (40-130 Kilometer) fällt dieser Wert wesentlich niedriger aus. Weil beim konventionellen Carsharing-Service außerdem in weniger als zwei Prozent aller Buchungen mehr als 30 Kilometer absolviert werden, ist von unterschiedlichen Anwendungsszenarien der beiden Mobilitätsangebote auszugehen [40, p. 7]. Gemeinsamkeiten der Konzepte können trotzdem im Hinblick auf die Integration ins örtliche Verkehrssystem ermittelt werden [40, p. 15]. Speziell die jeweiligen Flughäfen kristallisieren sich als essenzielle und stark frequentierte Ziele heraus, die mit Carsharing-Fahrzeugen angesteuert werden [40, pp. 12-13]. In gleicher Weise finden sich Anzeichen für eine multimodale Verwendung der Pkw wieder [40, pp. 12-13].

Ergänzend dazu bestätigen Ergebnisse einer nordamerikanischen Internetumfrage aus dem Jahr 2004 die Erkenntnisse der BeeZero-Analyse [41, pp. 3-3]. Aktive Carsharing-Mitglieder sollten im Rahmen der Befragung verschiedene Vorhaben anführen, die sie zu einer Pkw-Leihe veranlassen [41, pp. 3-11]. Erholung/Soziale

Anlässe (55,4 %) und Einkäufe (50,9 %) wurden bei dieser Gelegenheit als häufigste Gründe vorgebracht [41, pp. 3-12]. Dies lässt sich zum Großteil auf die Resultate der BeeZero-Untersuchung übertragen: Die Kategorien 6 (Gastronomie: 25,74 %), 2 (Sport, Kultur & Freizeit: 19,80 %) und 1 (Einzelhandel & Dienstleistungen: 10,89 %) sind jeweils unter den vier beliebtesten Fahrzwecken anzutreffen. Sowohl die Online-Umfrage als auch die Analyse des BeeZero-Kundenverhaltens unterstreichen darüber hinaus den Transport von Gegenständen als ideales Einsatzgebiet von Carsharing-Autos [41, pp. 3-12]. Berufliche Termine sind demgegenüber als Anlass einer Leihe in geringerem Ausmaß vertreten [41, pp. 3-12].

Zusammenfassend grenzt sich das BeeZero-Konzept deutlich von konventionellen Carsharing-Anbietern ab. Durch das zonenbasierte Betriebssystem eignen sich die zur Verfügung gestellten Fahrzeuge weniger für Kurzstrecken und Einzelfahrten, sondern sind vielmehr für lang andauernde Ausleihen und Rundfahrten prädestiniert [42, p. 1], [43, p. 4]. Demzufolge erweisen sich Tagesausflüge und Touren zu Erholungsorten im Münchener Umland als gängige Intentionen, die einer Inanspruchnahme des BeeZero-Services zugrunde liegen. Gestützt wird dieses Erkenntnis durch eine verhältnismäßig intensivere Nutzung der FCEV an arbeitsfreien Tagen. Berufliche Fahrzwecke sind im Vergleich zu den anderen Carsharing-Diensten weniger klar ausgeprägt, was den von Freizeit dominierten Verwendungsscharakter der BeeZero-Fahrzeuge akzentuiert.

Durch den großzügigen Kofferraum zeichnet sich der Hyundai ix35 FC für den Transport sperriger Gegenstände aus [42, p. 2], [44, p. 19]. Deshalb – und aufgrund des hohen Komforts – greifen Kunden insbesondere bei Großeinkäufen auf diese Mobilitätsalternative zurück, was durch zahlreiche Cluster in der Nähe von Möbelhäusern, Baumärkten und Gartencentern verifiziert werden kann [41, pp. 3-12]. Nicht zu vernachlässigen ist zudem der Gebrauch der BeeZero-Pkw, um an Wochenenden und Feiertagen Familie oder Freunde außerhalb Münchens zu besuchen. Dieser Anwendungsfall spielt vor allem bei jüngeren Nutzern eine Rolle. Des Weiteren stellt sich, wie bei anderen Carsharing-Konzepten, der örtliche Flughafen als attraktives Ziel heraus, der nahezu unabhängig von sämtlichen Einflussfaktoren frequentiert wird [40, pp. 12-13].

Abschließend ist daher zu resümieren, dass das Bestreben des BeeZero-Projekts, sich von anderen Carsharing-Anbietern zu differenzieren, in der Realität attestiert werden kann [42, p. 1]. Die hohe Reichweite des Brennstoffzellenantriebs gewährleistet, längere Strecken zuverlässig und umweltschonend zurückzulegen [45, p. 11]. Trotz der technischen Realisierbarkeit ergeben sich allerdings weiterhin finanzielle und infrastrukturelle Hindernisse, die für einen längerfristig wirtschaftlichen Carsharing-Betrieb überwunden werden müssen [43, p. 2], [45, p. 141].

6) AP 3.6: Erforschung Nutzerprofile

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen einer Online-Kundenbefragung (N = 358) erhoben, die über einen Newsletter versandt wurde. Die Online-Befragung wurde gezielt für mobile Endgeräte entwickelt, damit Kunden möglichst einfach und angenehm an der Studie teilnehmen konnten (über 40% nahmen mit einem Mobilfunkgerät an der Befragung teil). Die durchschnittliche Interviewlänge betrug 10,01 Minuten (Median).

a) Soziodemographische Faktoren: Alter, Geschlecht, Einkommen, Bildungsstand

Die BeeZero Nutzer stellen insgesamt eine sehr homogene Kundengruppe dar, die überdurchschnittlich gut ausgebildet ist und ein hohes Einkommen vorweisen kann. Zwei Drittel der Nutzer sind zwischen 30 und 59 Jahre alt. Der männliche Anteil an Nutzern ist mit 87,2% signifikant höher, als der weibliche Anteil (12,8%).

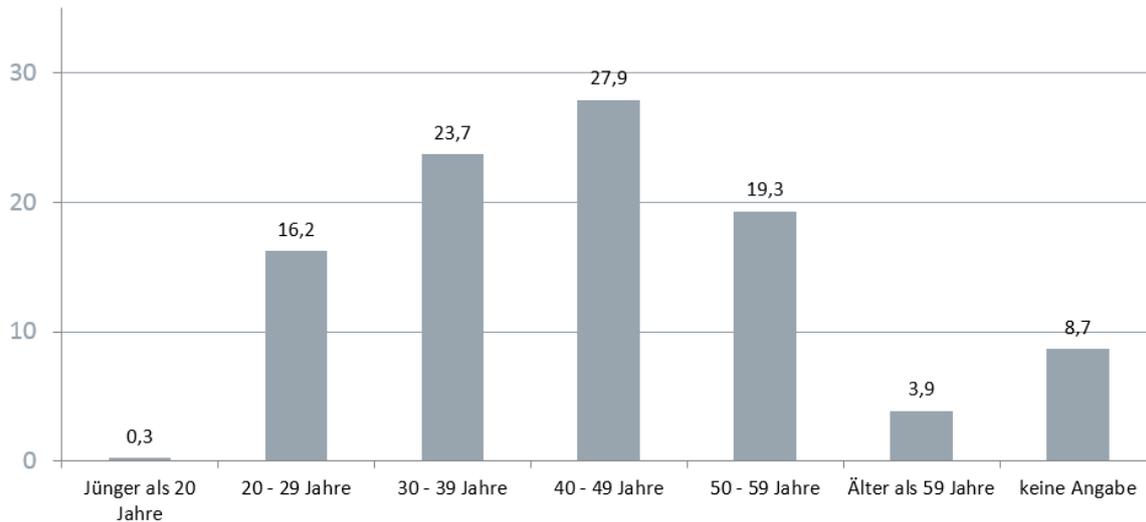


Abbildung 63: Verteilung der BeeZero-Kunden nach Altersgruppen (die y-Achse stellt dabei die prozentuale Verteilung der Altersgruppen dar)

b) Ableitung und Beschreibung der Nutzerprofile

Bei der Analyse der Ergebnisse konnten 4 Kundensegmente identifiziert werden:

Cluster 1 „Lifestyler“ (n=114)	Cluster 2 „LOHAS“ (n=86)	Cluster 3 „Nerds“ (n=85)	Cluster 4 „LOVOS“ (n=63)
 <ul style="list-style-type: none"> • Die Zielgruppe der Lifestyler ist trendbewusst, Geld spielt dabei eine untergeordnete Rolle • Diese Zielgruppe legt viel Wert auf das Äußere • Diese Zielgruppe ist etwas weiblicher als die anderen Zielgruppen 	 <ul style="list-style-type: none"> • Abkürzung für: Lifestyles of Health and Sustainability • Pflegen einen umwelt- und gesundheitsbewussten Lebensstil • Nachhaltigkeit und soziale Verantwortung ist ihnen wichtig 	 <ul style="list-style-type: none"> • Die Gruppe der „Nerds“ zeichnet sich durch ihre hohe Affinität zu sozialen Medien und Gaming Apps aus • Diese Zielgruppe ist jünger als die anderen Zielgruppen und hat eher ein geringeres Einkommen sowie seltener Kinder 	 <ul style="list-style-type: none"> • Abkürzung für: Lifestyles of Voluntary Simplicity • Streben nach einem bewussten Konsumverzicht und sind eher bereit, Dinge zu teilen • Gleichzeitig möchte diese Zielgruppe Geld sparen

Abbildung 64: Identifizierte Kundensegmente

Hinsichtlich der Nutzungshäufigkeit konnten dabei 3 Gruppen identifiziert werden:

Frequent User	Occasional User	Non User
Nutzt BeeZero mind. mehrmals pro Jahr	Nutzt BeeZero einmal pro Jahr oder seltener	Nutzt BeeZero gar nicht
n = 139 (38,8%)	n = 115 (32,1%)	n = 104 (29,1%)

Abbildung 65: Nutzungshäufigkeit BeeZero: BeeZero Kundenbefragung 2017 – 24.01.2018

c) Mobilitätsverhalten

Anhand der erhobenen Informationen im Rahmen der Online Kundenbefragung lassen sich zum Mobilitätsverhalten der BeeZero-Kunden folgende Ergebnisse zusammenfassen:

Mit knapp 56,2% verfügt die knappe Mehrheit der BeeZero-Nutzer über ein eigenes Auto. Die meisten Kunden, die BeeZero häufig nutzen, sind wiederum nicht im Besitz eines eigenen Fahrzeugs.

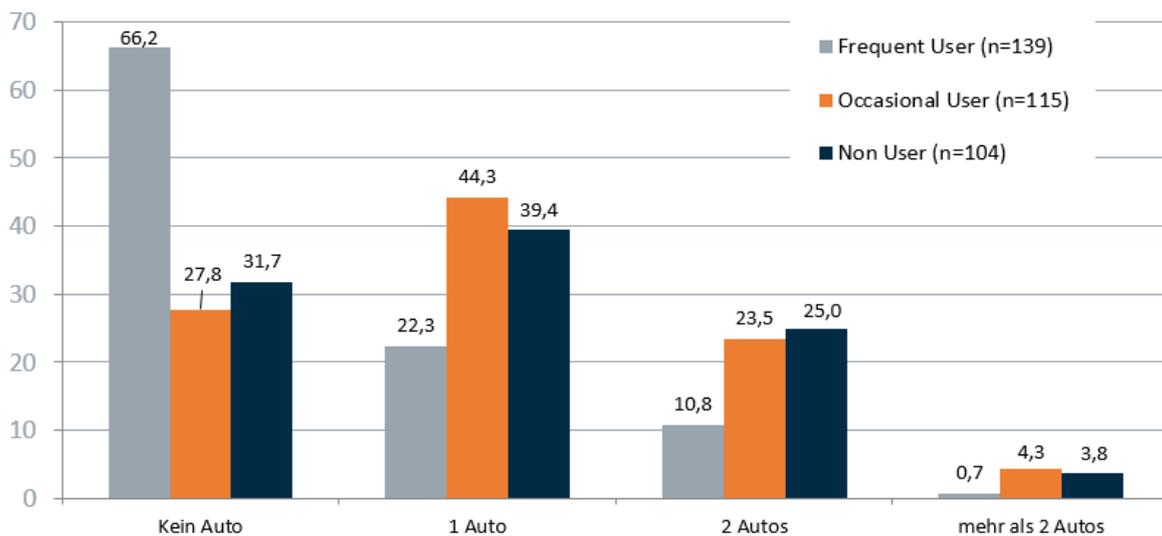


Abbildung 66: Autos je Haushalt nach Nutzungshäufigkeit: BeeZero Kundenbefragung 2017 – 24.01.2018 (N=358)

Gefolgt vom eigenen Fahrzeug wird von den Befragten am häufigsten ein Carsharing-Auto benutzt.

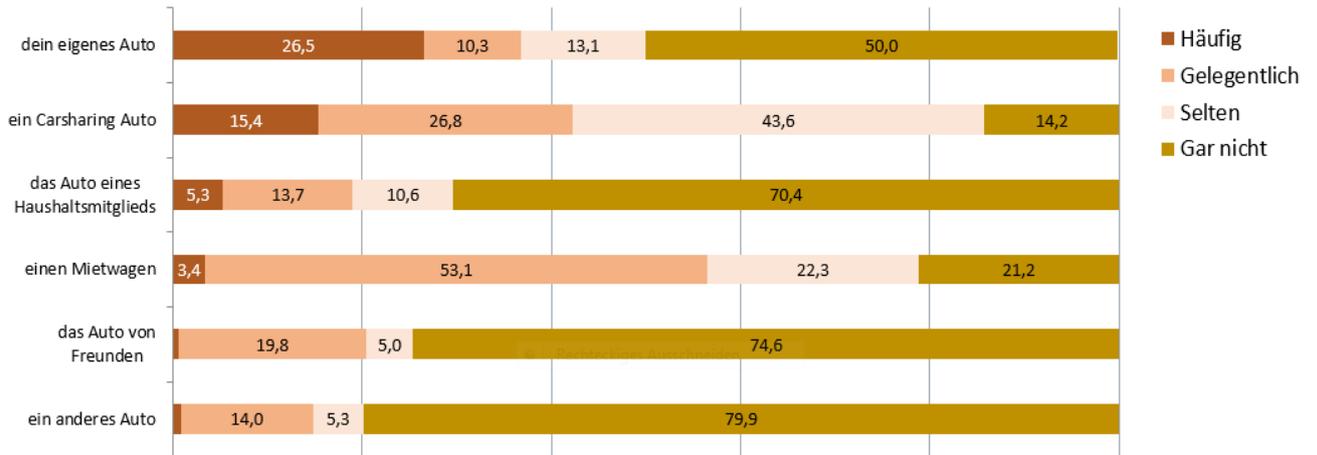


Abbildung 67: Nutzungshäufigkeit nach Mobilitätsmöglichkeiten: BeeZero Kundenbefragung 2017 – 24.01.2018 (N=358)

Als Gründe für die Nutzung von Carsharing wurden am häufigsten einfaches Handling, der „Sharing“-Aspekt (Teilen) und ökologische Gründe genannt. Bei spontan genannten Gründen wurde die Alternative zum Nahverkehr am häufigsten erwähnt.

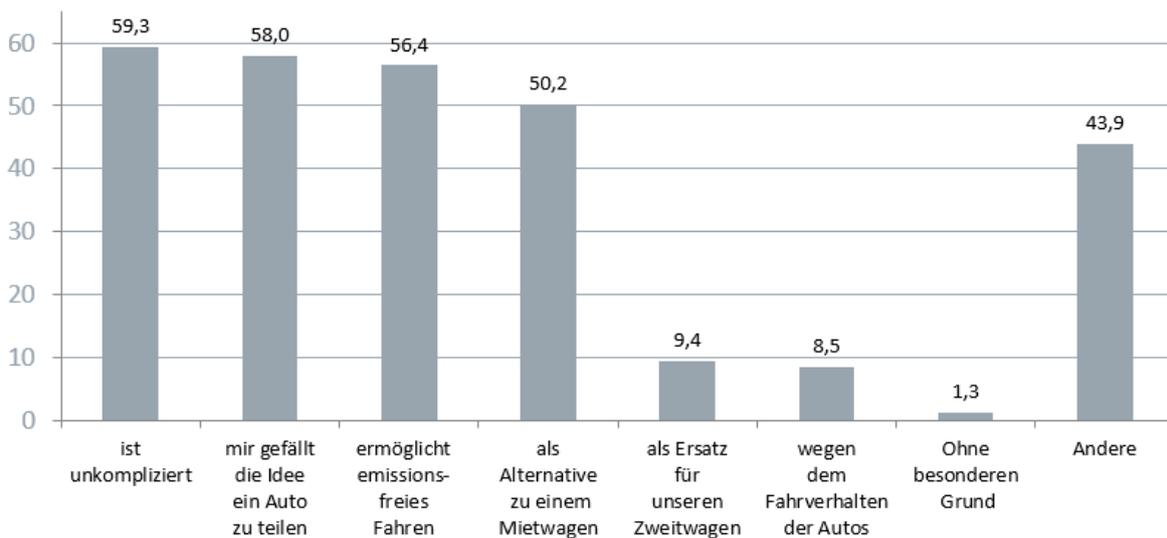


Abbildung 68: Motivation für Carsharing: BeeZero Kundenbefragung 2017 – 24.01.2018

Die Hauptmotivation der BeeZero Frequent User ist die unkomplizierte und emissionsfreie Idee des H2-Carsharings.

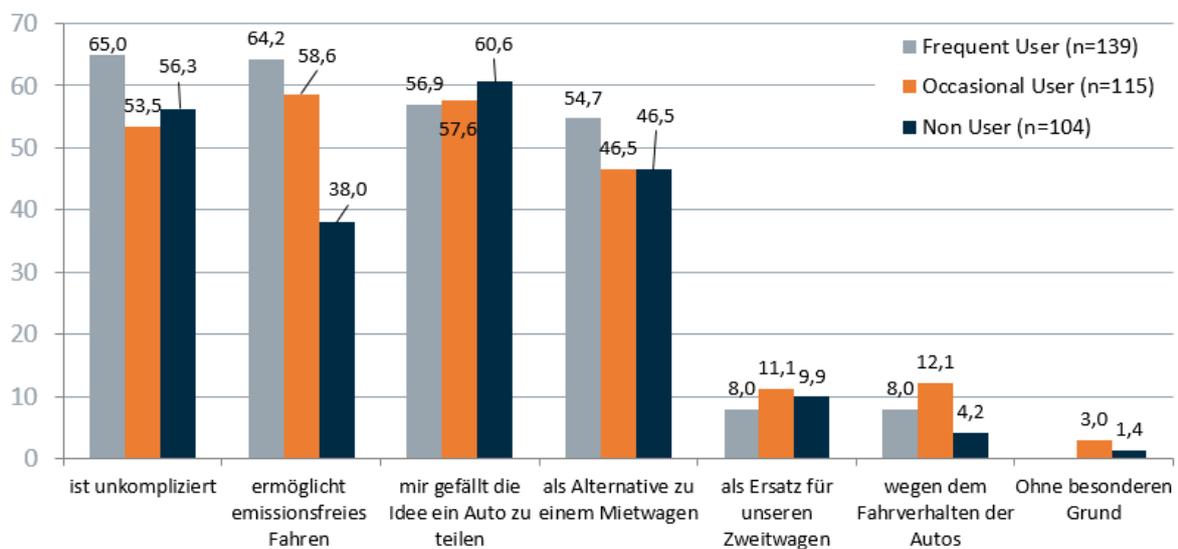


Abbildung 69: Motivation für „BeeZero“ Carsharing unterteilt nach Nutzungshäufigkeit: „BeeZero“ Kundenbefragung 2017 – 24.01.2018 (N= 307)

Die Befragten gaben an, Carsharing besonders häufig für Besuche bei Freunden, Fahrten zum Flughafen oder für Tagesausflüge zu nutzen.

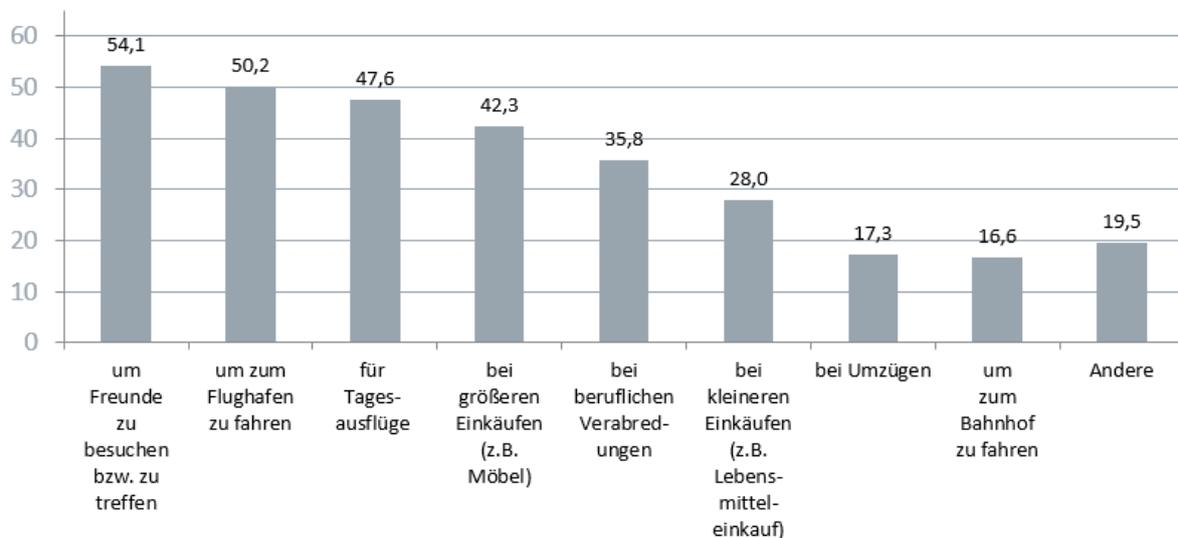


Abbildung 70: Einsatzbereich Carsharing allgemein: BeeZero Kundenbefragung 2017 – 24.01.2018 (N= 307)

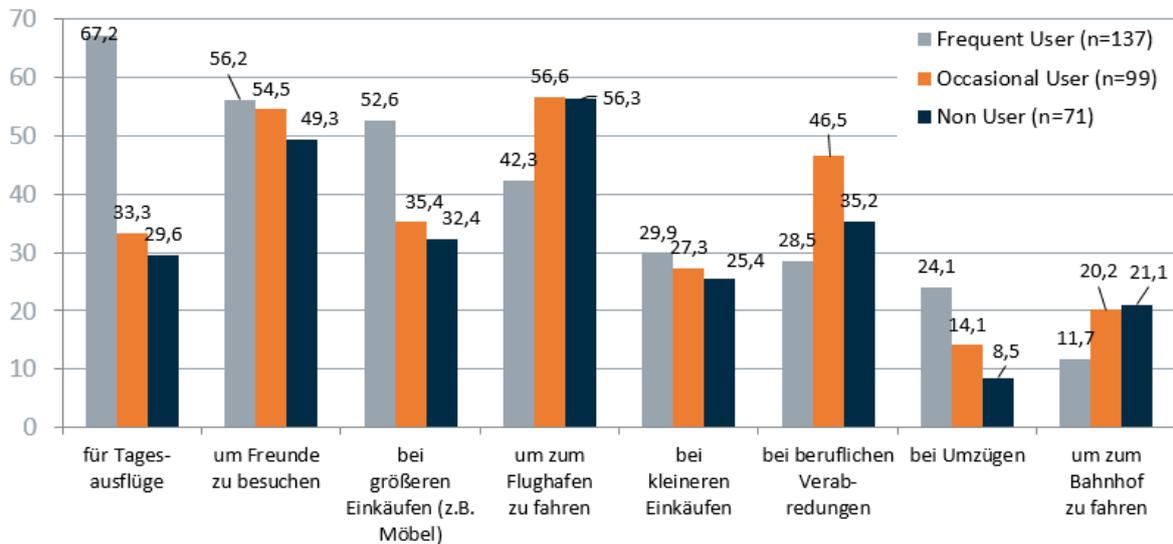


Abbildung 71: Einsatzbereich BeeZero Carsharing unterteilt nach Nutzungshäufigkeit: BeeZero Kundenbefragung 2017 – 24.01.2018 (N = 207)

Fast 70% der Frequent User nutzen Carsharing für Tagesausflüge. Wichtigster Grund gegen BeeZero wurde die fehlende Verfügbarkeit im eigenen Gebiet genannt. Bei den Kunden, die BeeZero wenig nutzten, wurden die mangelnde Verfügbarkeit und das Fehlen von One-Way-Touren als häufigste Gründe angemerkt.

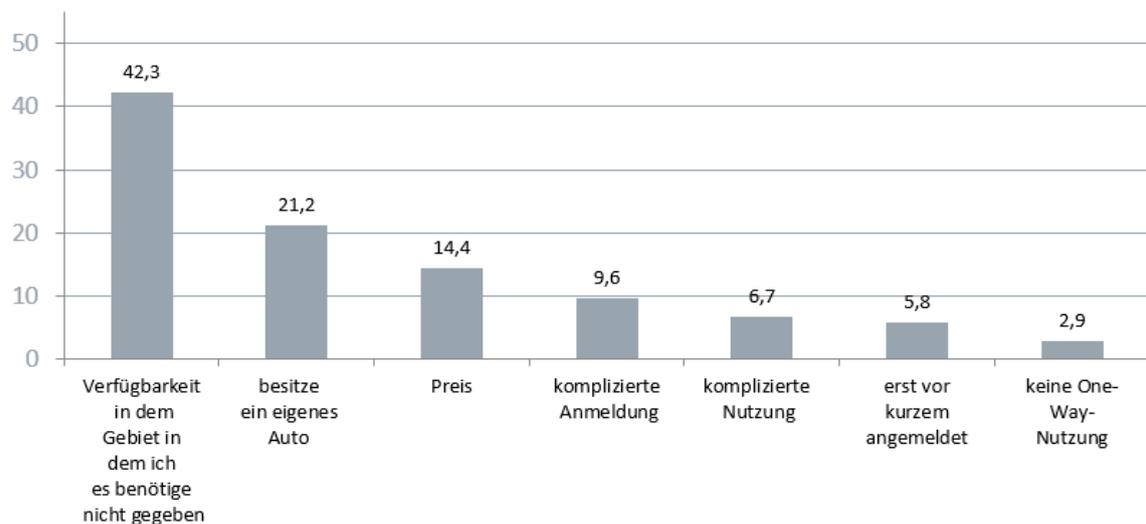


Abbildung 72: Gründe für eine Nicht-Nutzung des BeeZero-Angebotes: BeeZero Kundenbefragung 2017 – 24.01.2018 (N=358)

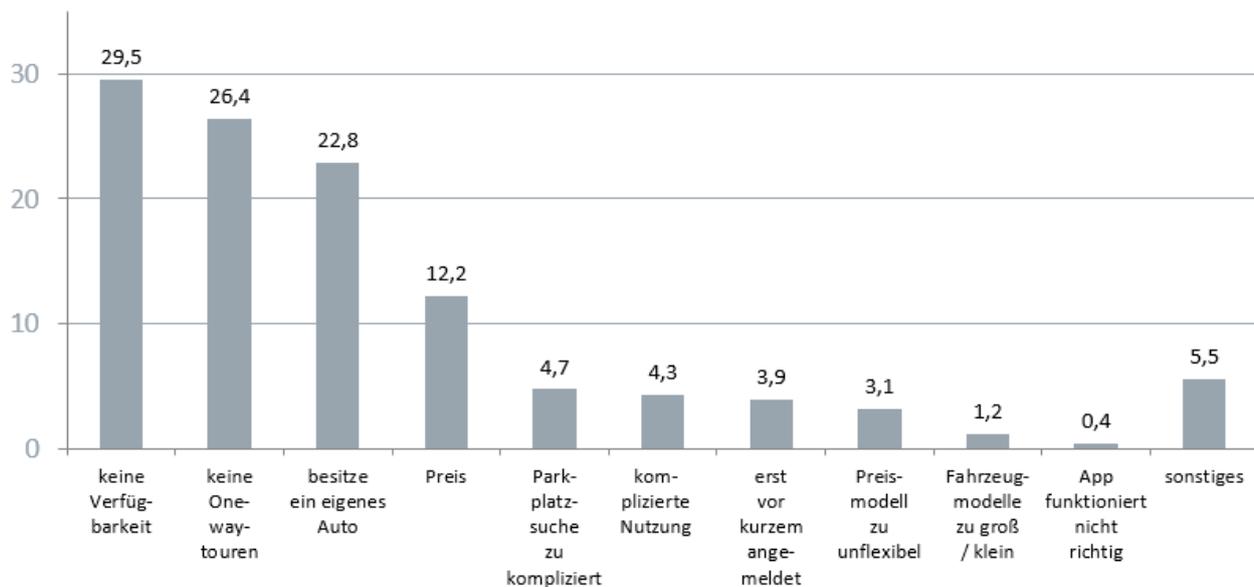


Abbildung 73: Gründe für eine geringe Nutzung von „BeeZero“: „BeeZero“ Kundenbefragung 2017 – 24.01.2018 (N=254)

Die wichtigsten Aspekte für die Nutzung von Carsharing ist bei den „LOHAS“ (Cluster 2) die Umweltfreundlichkeit, wohingegen der Preis bei den „Nerds“ (Cluster 3) am wichtigsten ist. Am wenigsten preissensitiv sind die „LOHAS“.

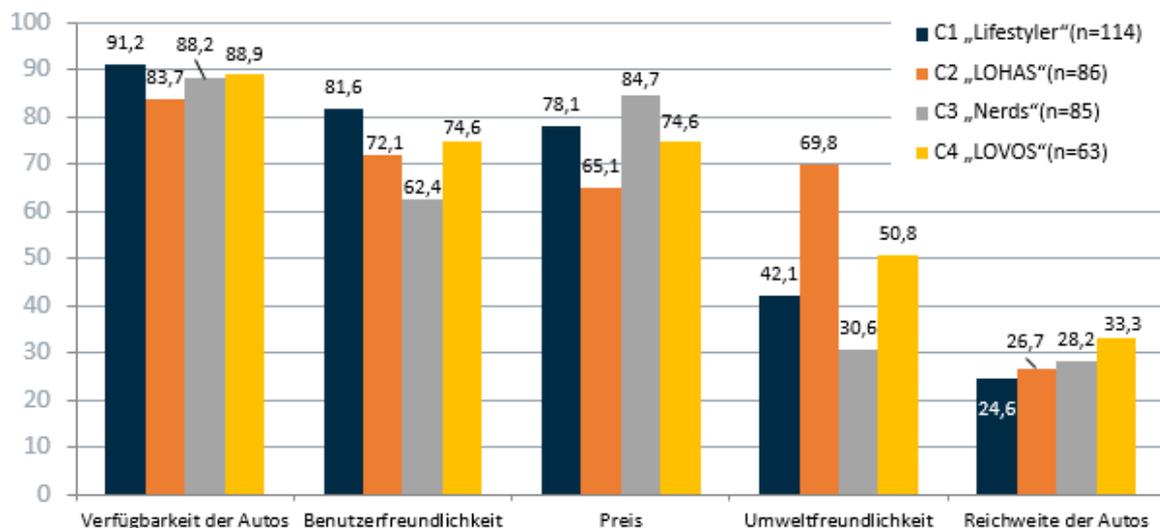


Abbildung 74: Wichtige Aspekte beim Carsharing nach Nutzerprofilen: BeeZero Kundenbefragung 2017 – 24.01.2018 (N=358)

d) Lifestyle

Um ein präziseres Bild von den BeeZero-Nutzern zu bekommen, wurden im Rahmen der Befragung verschiedene Aspekte zum Konsumverhalten analysiert. Die wichtigsten Erkenntnisse hierzu sind nachfolgend kurz zusammengefasst.

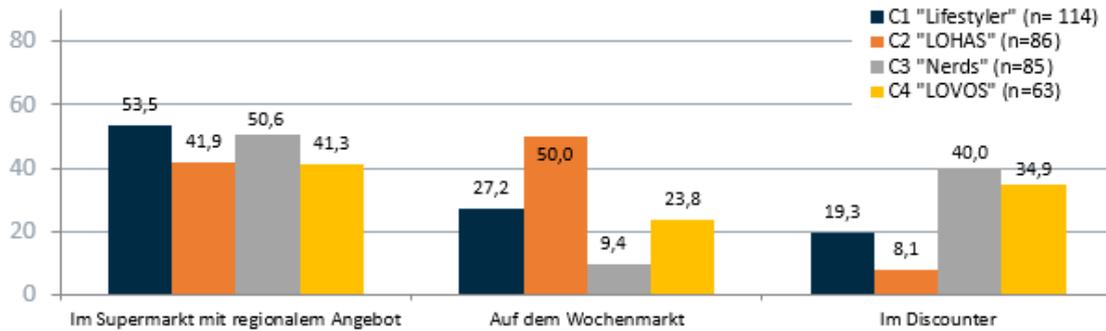


Abbildung 76: Gemüseeinkauf nach Nutzerprofilen: BeeZero Kundenbefragung 2017 – 24.01.2018 (N=358)

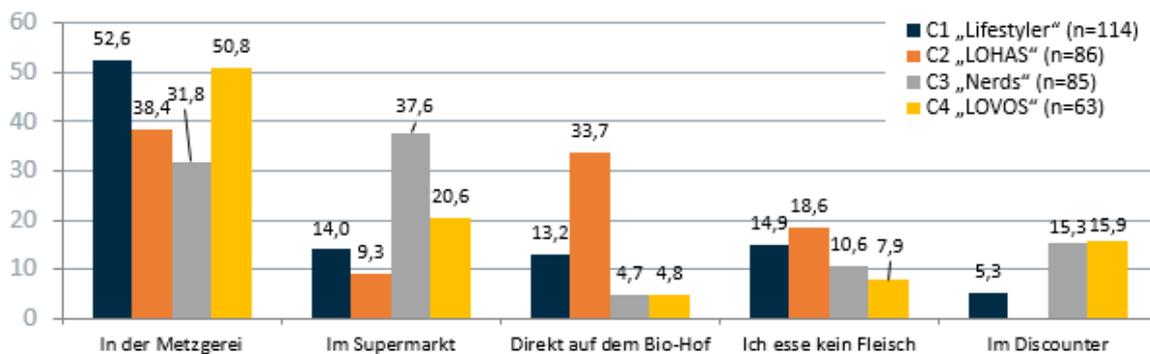


Abbildung 75: Fleischeinkauf nach Nutzerprofilen: „BeeZero“ Kundenbefragung 2017 – 24.01.2018 (N=358)

Generell spielt das Thema Nachhaltigkeit für alle Kundengruppen eine große Rolle, wobei vor allem die "LOHAS" (Cluster 2) auf dem Wochenmarkt einkaufen und ihr Fleisch auf dem Bio-Hof erwerben, während die "Nerds" Wochenmärkte kaum nutzen. Wie bereits erwähnt, handelt es sich insgesamt um eine sehr homogene Kundengruppe mit einem gehobenen Bildungs- und Einkommensniveau. Sowohl bei Konsumgütern des täglichen Bedarfs wie Schokolade, als auch bei Mobiltelefon entscheiden sich jeweils mehr als die Hälfte der Kunden für Markenprodukte.

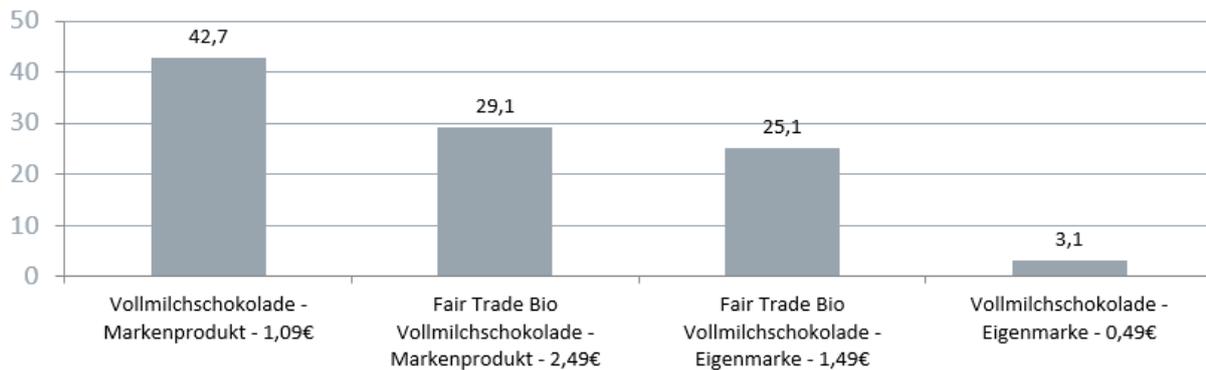


Abbildung 77: Schokoladenkauf: BeeZero Kundenbefragung 2017 – 24.01.2018 (N=358)

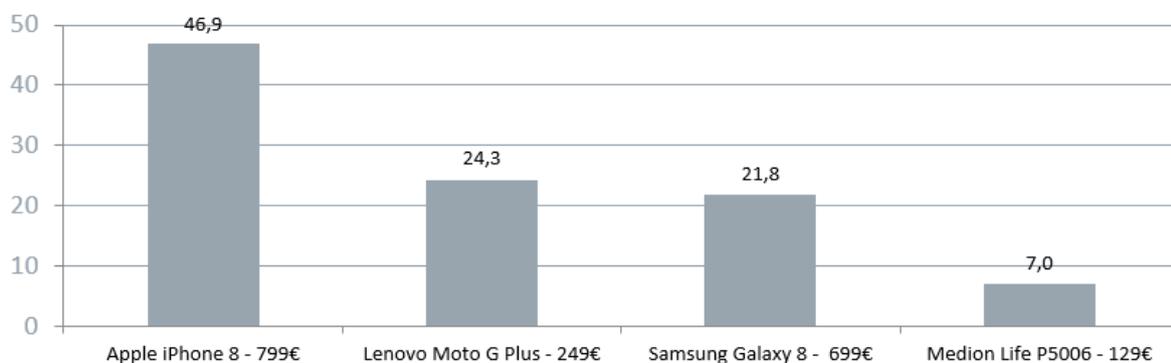


Abbildung 78: Smartphonekauf: „BeeZero“ Kundenbefragung 2017 – 24.01.2018 (N=358)

e) Resonanz der Nutzer auf das Carsharing-Modell

Die hierbei durchgeführten Untersuchungen umfassen:

- Qualitative Kundenumfragen
- Quantitative Kundenumfrage via “Rate-your-trip“ Funktion in der BeeZero-App
- Analyse der gefahrenen Streckenlängen
- Analyse der Häufigkeit der gefahrenen Streckenlängen
- Analyse der Regelmäßigkeit der Nutzung
- Durchschnittliche Nutzungshäufigkeiten, -distanzen und -dauern

Die Ergebnisse können dem Arbeitspaket 3.7 entnommen werden.

f) Ansprüche und Forderungen der Nutzer an die FCEV-Technologie

Im Rahmen einer qualitativen Kundenumfrage wurden die Ansprüche und Forderungen an die FCEV-Technologie untersucht. Neben 10 interessierten Nutzern des Carsharing-Konzeptes (nachfolgend **Kunden** genannt), wurden 8 Stakeholder aus den Bereichen wie Sustainability, H2 Community und OEM befragt (darunter Münchner Verkehrsgesellschaft MVG, Hyundai, Carsharing-Anbieter wie Drive Now und Clever Shuttle, Tankstellenbetreiber Allguth und Unternehmen mit Ausrichtung auf Nachhaltigkeit wie GreenCity e.V. und Kartoffelkombinat eG) (nachfolgend **Stakeholder** genannt). Bei Stakeholdern handelt es sich um Persönlichkeiten, die

direkt oder indirekt mit dem Thema Wasserstoffmobilität zu tun haben, jedoch keine Nutzer und somit Kunden des Carsharings waren.

Frage 1: „*Hat das BeeZero Angebot für dich im Vergleich zu anderen Carsharing Anbietern einen Mehrwert generiert?*“

Alle 10 Kunden haben die Frage mit Ja beantwortet. Dabei wurden der Umweltnutzen („Zero Emissions“) und der Technologiefortschritt besonders hervorgehoben. Von den Stakeholdern haben sich 7 positiv geäußert, einer negativ. Bei der negativen Antwort wurde jedoch der Bedarf nach einem privaten Fahrzeug und somit keine generelle Kritik am Carsharing-Konzept geäußert.

Frage 2: „*Was sind die Vorteile von BeeZero gegenüber anderen Mobilitätsangeboten?*“

Von den Kunden wurden die Verfügbarkeit, der technologische Fortschritt der Flotte und die Preissituation positiv beurteilt. Die Stakeholder lobten die Möglichkeit, Langstrecken zu fahren und den Umwelteffekt der Flotte.

Frage 3. „*Wie war dein Gefühl, als du zum ersten Mal ein BeeZero Fahrzeug genutzt hast?*“

Die Kunden waren zumeist begeistert oder waren positiv überrascht. Die Stakeholder positiv erstaunt und hatten ein gutes Gefühl beim Konzept.

Frage 4: „*Inwiefern, findest du, hat BeeZero zu einem verbesserten Mobilitätsangebot beigetragen?*“

Die Kunden haben insbesondere die erhöhte Flexibilität, die Möglichkeit für Großeinkäufe und Ausflüge, und den Ersatz für das Privatfahrzeug hervorgehoben. Die Stakeholder beurteilten darüber hinaus die Wertigkeit von BeeZero für den Carsharingmarkt als hoch ein.

Frage 5. „*Gab es bei der Nutzung des Fahrzeugs Probleme?*“

6 Kunden verneinten, 4 stimmten zu. Dabei wurde angemerkt, dass das Auto entweder nicht ansprang oder die Geschwindigkeit nicht vollständig ausgenutzt werden konnte. Die Stakeholder konnten diese Frage nicht beantworten.

Frage 6: *Hast du dich bereits vor BeeZero mit alternativen Antriebstechnologien auseinandergesetzt? Wenn ja, mit welchen?*

Alle 10 befragten Kunden bejahten, wobei batteriebetriebene E-Autos im Vordergrund des Interesses standen. Hybrid und Wasserstoff wurden vereinzelt genannt. Von 8 befragten Stakeholdern, haben sich 6 mit alternativen Technologien auseinandergesetzt, wobei alle verfügbaren Lösungen im Fokus des Interesses lagen, nicht nur batteriebetriebene E-Autos.

Frage 7: „*Hast du vor BeeZero schon einmal was von der Brennstoffzellen-Technologie gehört?*“

Von 10 befragten Kunden haben 9 mit Ja geantwortet. Von 8 Stakeholdern, hatten 6 bereits von Brennstoffzellen gehört.

Frage 8. „Wusstest du vor BeeZero, dass die Brennstoffzellen-Technologie Elektromotoren antreibt und eine Batterie ersetzt?“

Von 10 befragten Kunden haben 8 mit Ja geantwortet. Von 8 Stakeholdern, haben 6 davon gewusst.

Frage 9. „Hast du dich nach der/ durch die Nutzung von BeeZero mehr mit alternativen Antriebstechnologien auseinandergesetzt?“

Von 10 befragten Kunden haben 7 mit Ja geantwortet. Von 8 Stakeholdern haben sich 5 mit alternativen Antriebstechnologien auseinandergesetzt. Die Kunden/Stakeholder hoben das große Potential der H2-Technologie hervor.

Frage 10. *Wie hat sich dein Kenntnisstand/ Wissen/ Einstellung durch BeeZero verändert, hinsichtlich ...*

Sicherheit: „Hohes Sicherheitsgefühl“

Verfügbarkeit: „schlechte Tankstellenverfügbarkeit, zu wenige Anbieter“

Reichweite: „Ausreichend mit Luft nach oben“

Marktreife: „Marktreife durchaus gegeben“

Die Antworten geben die jeweilige Zusammenfassung des Kundenfeedbacks wieder. Stakeholder wurden hierzu nicht befragt.

Frage 11: „Was sind aus deiner Sicht die Vorteile der Brennstoffzellentechnologie?“

Die allermeisten Kunden wiesen auf den Umweltnutzen („Zero Emission“) hin, vereinzelt wurden auch die sorglose Entsorgung der Batterie, geringe Lärmbelastung und das schnelle Betanken genannt. Die Stakeholder wiesen neben dem Umweltnutzen, auf den hohen Komfort, die hohe Reichweite und schnelle Betankung hin.

Frage 12. *Welchen der angepriesenen Vorteile von Wasserstoff stimmst du zu?*

12. Welchen der angepriesenen Vorteile von Wasserstoff stimmst du zu?	Kunde			Stakeholder		
	Ja	Nein	Keine Antwort	Ja	Nein	Keine Antwort
Tankvorgang: Ist schnell und unkompliziert	4	1	6	6	1	1
Emission: Die Nutzung der Wasserstofftechnologie wirkt sich positiv auf die CO2 Belastung aus.	10			8		
Komfort: Der Komfort steht dem eines vergleichbaren Modells mit konventionellem Antrieb in nichts nach	10			8		
Reichweite: Die Reichweite ist ausreichend bzw. hat mich bei der Nutzung nicht eingeschränkt.	9	1		8		

Wie der obigen Tabelle zu entnehmen ist, wurde Wasserstoff von Kunden und Stakeholdern sehr positiv beurteilt.

Frage 13: „Welcher Vorteil ist dir am wichtigsten: Betankungszeit, Reichweite oder Ressourceneinsatz bei der Produktion?“

Für die Kunden war der Ressourceneinsatz, gefolgt von der Reichweite und der Betankungszeit am wichtigsten. Für die Stakeholder war die Betankungszeit ausschlaggebend, gefolgt von Ressourceneinsatz und Reichweite.

Frage 14: „Siehst du die Wasserstofftechnologie als eine echte Alternative zu konventionellen Technologien/ Batterieelektrischen Antrieben?“

Von den Kunden haben 9 von 10 mit Ja geantwortet, bei den Stakeholdern waren es alle 8.

Frage 15: „Könntest du dir vorstellen, auch privat ein Wasserstoff-Fahrzeug zu nutzen?“

Von den Kunden haben alle 10 mit Ja geantwortet, bei den Stakeholdern waren es 7 von 8 Befragten.

Frage 16: „Inwiefern findest du, ging BeeZero über ein rein funktionales Carsharing hinaus?“

Die befragten Kunden befürworteten das Fahren „ohne Fußabdruck“ (gemeint ist hier Umweltnutzen), den Nachhaltigkeitsaspekt und das Gefühl, Vorreiter bzw. Pionier in der Nutzung eines neuen Geschäftsmodells zu sein. Die Stakeholder verwiesen allen voran auf das „Pioneer-Gefühl“.

Frage 17: „Kennst du andere BeeZero Nutzer?“

Hier waren die Antworten gespalten: 6 von 10 befragten Kunden kannten andere Nutzer, von den Stakeholdern waren es 4.

Frage 18: „Hat BeeZero deine Lebensweise, deinen Lebensstil beeinflusst?“

Von den Kunden haben sich 7 von 10 positiv geäußert. Stakeholder haben dies nicht bewerten können, da sie keine Nutzer waren.

Frage 19: „Welche Erwartungen bzw. Ansprüche hattest du vor deiner ersten BeeZero-Fahrt an die Brennstoffzellentechnologie?“

Die Kunden hatten vor allem Erwartungen hinsichtlich langer Reichweite und komfortabler Fahrweise. Die Stakeholder erwarteten Zuverlässigkeit und hohe Reichweite.

Frage 20: „Was muss aus deiner Sicht getan werden, damit sich in Zukunft die Brennstoffzellentechnologie durchsetzen kann, bzw. für den Endverbraucher attraktiver wird?“

Mit 9 Antworten von der Kundenseite war der Tankstellenausbau die häufigste Antwort. Untergeordnete Rolle spielen Kostenreduzierung, weitere Erforschung der Technologie, politische Maßnahmen und eine höhere Marktaufklärung. Bei den Stakeholdern war die Kostenreduzierung mit 6 Antworten führend, gefolgt vom Tankstellenausbau mit 5 Antworten und mehr Aufklärung mit 3 Antworten.

Zusammengefasst kann ausgesagt werden, dass die befragten Kunden und Stakeholder einen Mehrwert im H2-Mobilitätskonzept im Vergleich zu etablierten und alternativen Konzepten sehen. Hervorgehoben wurden unter anderem der positive Umweltaspekt, die Flexibilität und die schnelle Betankung. Darüber hinaus schaffte es das Projekt, die Persönlichkeiten dazu zu bewegen, sich stärker mit alternativen

umweltfreundlichen Antriebstechnologien auseinander zu setzen – das ist neben dem Erfolg des Geschäftsmodells ein wesentliches Resultat des Projektes.

7) AP 3.7: Erforschung Fahrtmuster

Dichteverteilungen über Nutzungsfaktoren: Tageszeit, Wochentag, Regelmäßigkeit, Streckenlänge

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden Fahrzeug- und Buchungsdaten und Kilometerstände untersucht. Dabei wurden Daten zwischen August 2016 und Mai 2018 ausgewertet. Es wurden 7458 Buchungen unter Berücksichtigung folgender Kriterien analysiert:

- Ausschließlich Kunden-Buchungen (Buchungen für Dienstleister und Linde-Mitarbeitern wurden nicht berücksichtigt)
- Keine „0 km“-Buchungen (evtl. Tests der App oder fehlgeschlagene Buchungen)
- Als Startzeit der Buchung gilt die Zeit, wo der Kunde das Fahrzeug öffnet oder nach 1 Stunde nach der Fahrzeugreservierung (ab 1 Stunde ist die Reservierung nicht mehr kostenlos)

Ergebnisse:

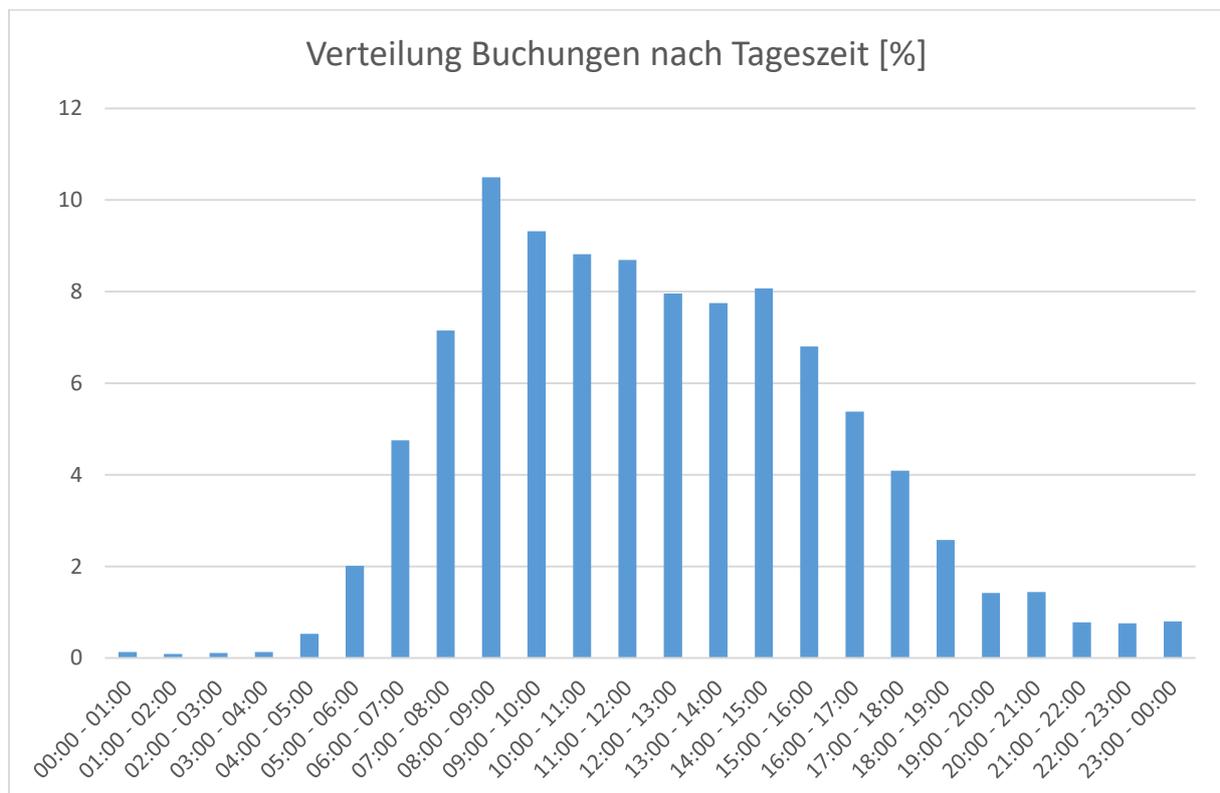


Abbildung 79: Buchungen nach Tageszeit

Die meisten Buchungen wurden jeweils am Vormittag ausgeführt. Da die Fahrzeuge zumeist für längere Strecken gebucht wurden, passen die Ergebnisse zur Modellannahme mit vielen Tagesfahrten (Start in der Früh und Rückgabe am Nachmittag oder am Abend). Das wird nochmal durch die Abbildung 80 bestätigt.

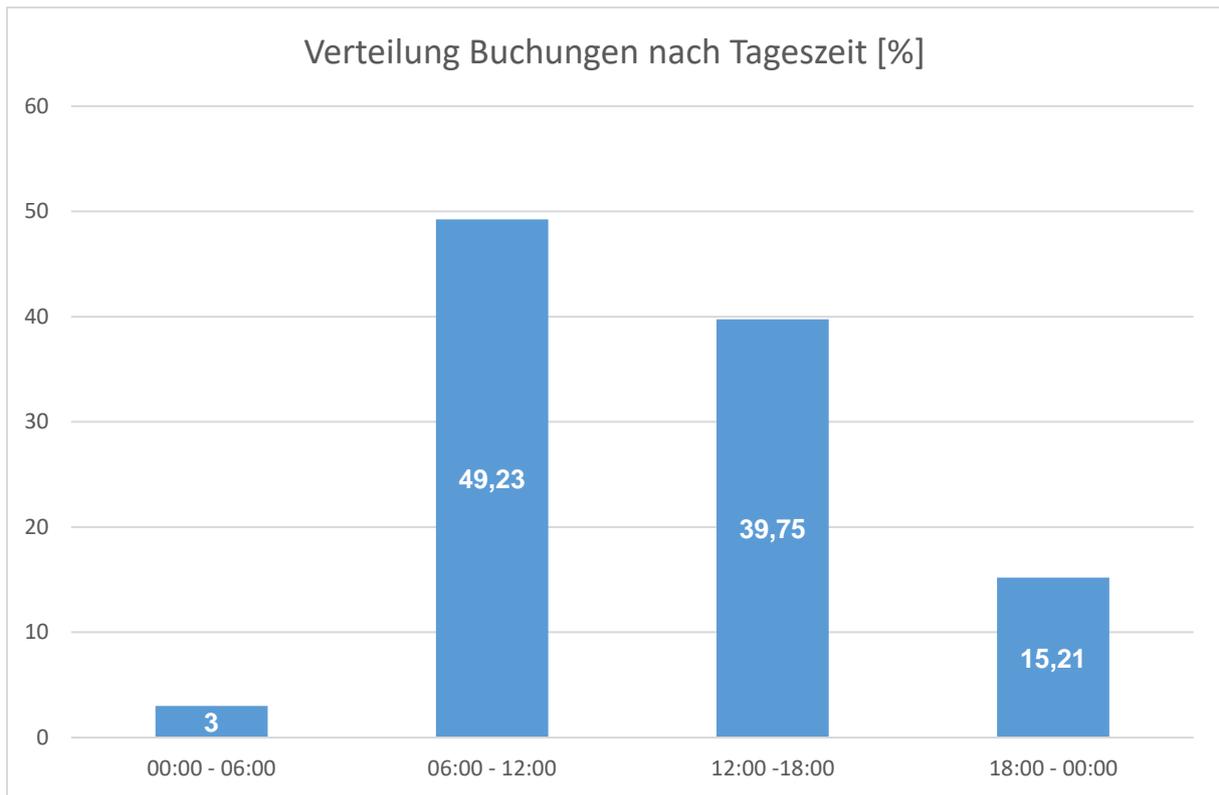


Abbildung 80: Prozentuale Verteilung der erfolgten Buchungen nach Tageszeit

Die Tatsache, dass die meisten Fahrten im Zeitfenster 09:00–12:00 ausgeführt wurden, bestätigt die Zielsetzung der Kunden, Ausflüge mit einer Dauer von einem halben oder ganzen Tag durchzuführen, wobei als Tagesausflugziel zumeist das Münchner Umland gewählt wurde.

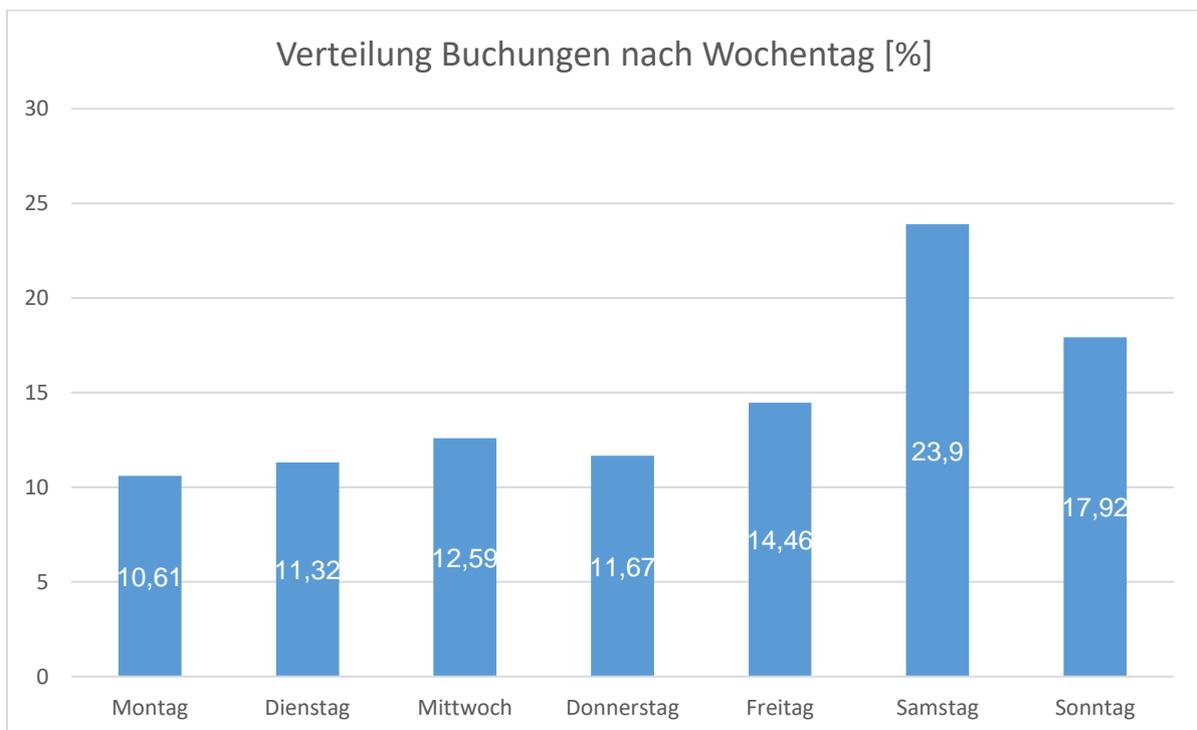


Abbildung 81: Buchungen nach Wochentag

Auch am Wochenende wurden die Fahrzeuge zumeist am Vormittag ausgeliehen:

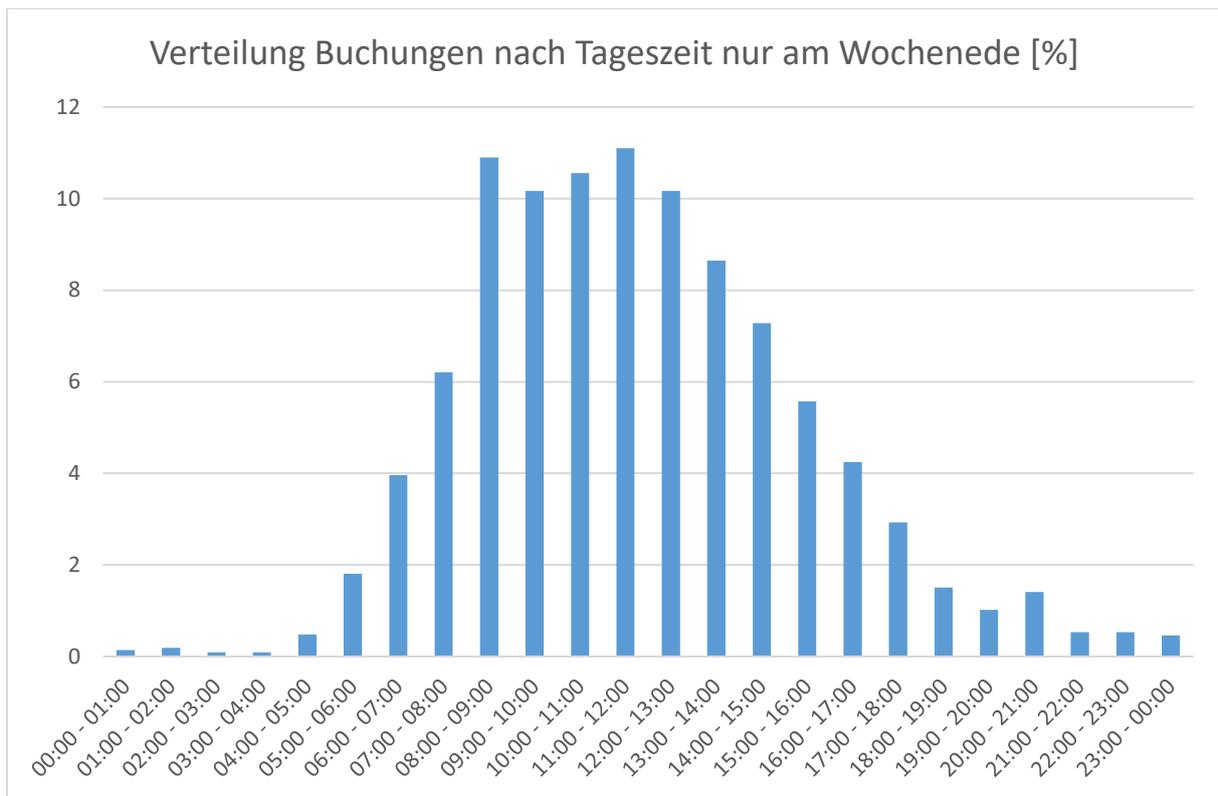


Abbildung 82: Verteilung Buchungen nach Tageszeit nur am Wochenende

Während der Arbeitswoche wurden die Fahrzeuge am frühen Vormittag und wieder verstärkt am Nachmittag ausgeliehen:

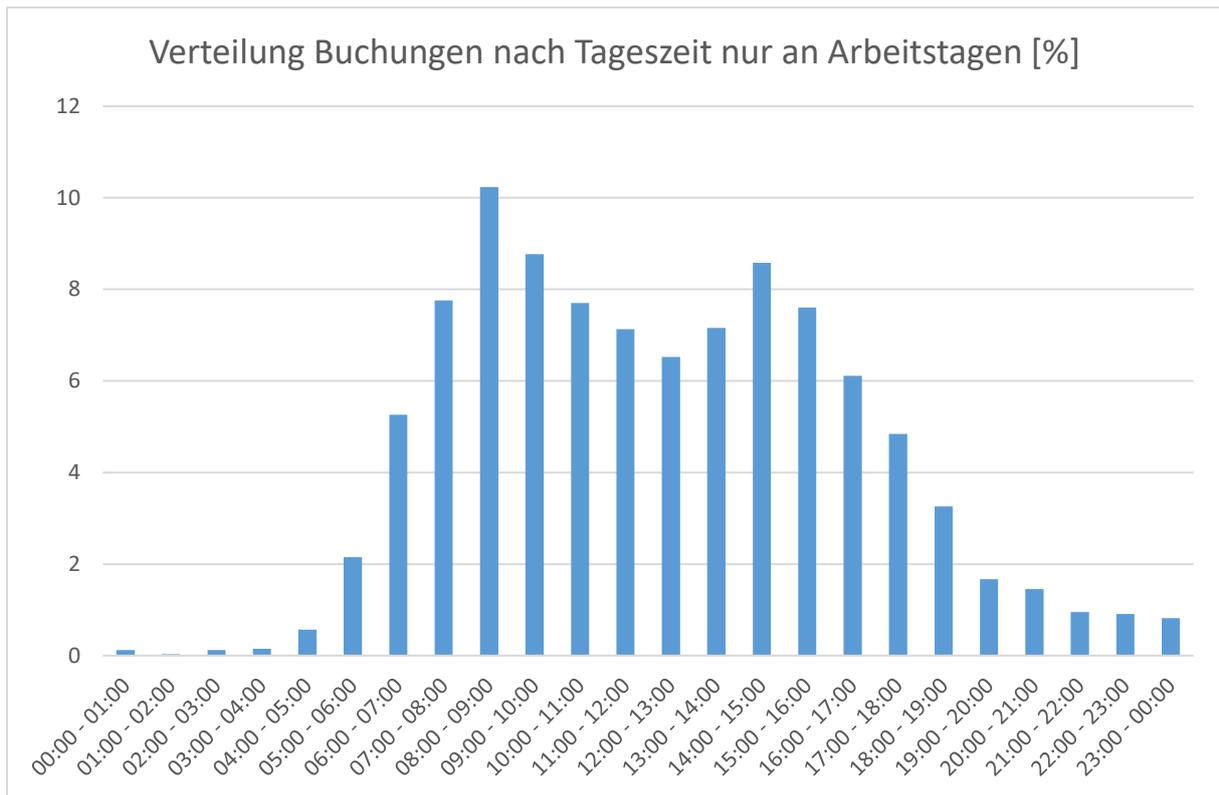


Abbildung 83: Verteilung Buchungen nach Tageszeit an Arbeitstagen

Die meisten Kunden (42%) haben bei BeeZero nur einmal ein Fahrzeug gemietet. 2,32% der Kunden haben Fahrzeuge mehr als 30 Mal ausgeliehen.

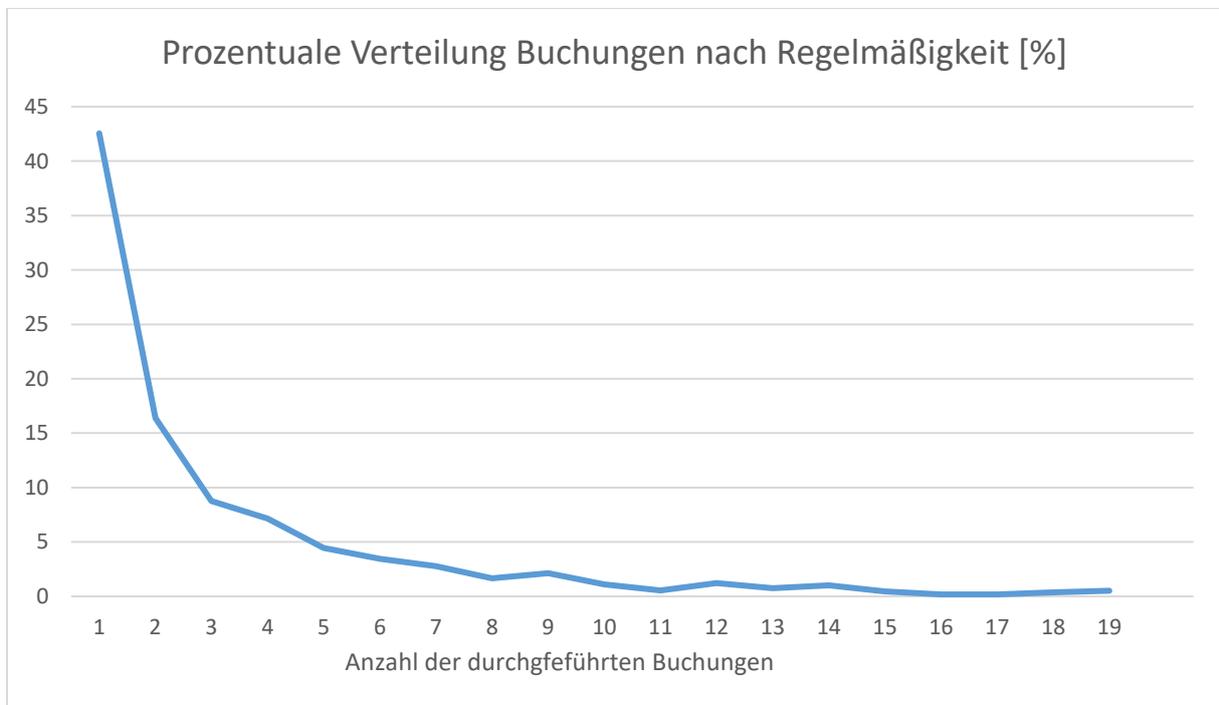


Abbildung 84: Prozentuale Verteilung der Buchungshäufigkeit

In beinahe 70% der Fälle wurden die Fahrzeuge für Streckenlängen unterhalb von 50 km verwendet.

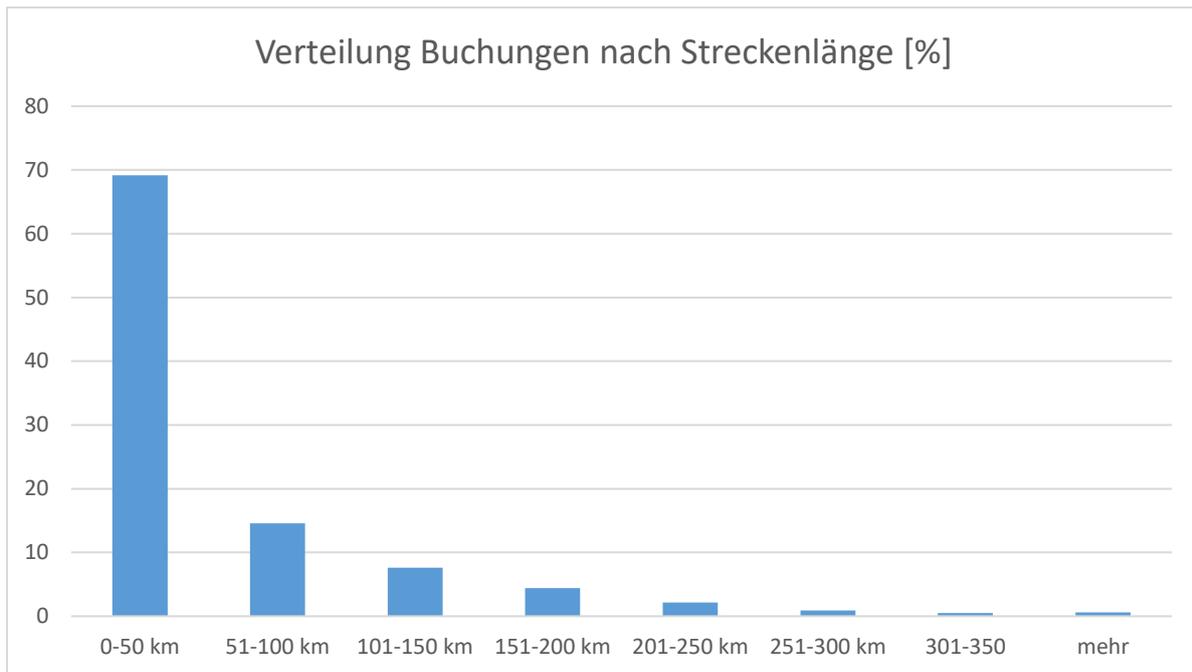


Abbildung 85: Buchungen nach Streckenlänge

Dabei konnte festgestellt werden, dass am Wochenende die größten Distanzen zurückgelegt wurden – das bestätigt die bisherigen Analysen zum Mobilitätsverhalten.

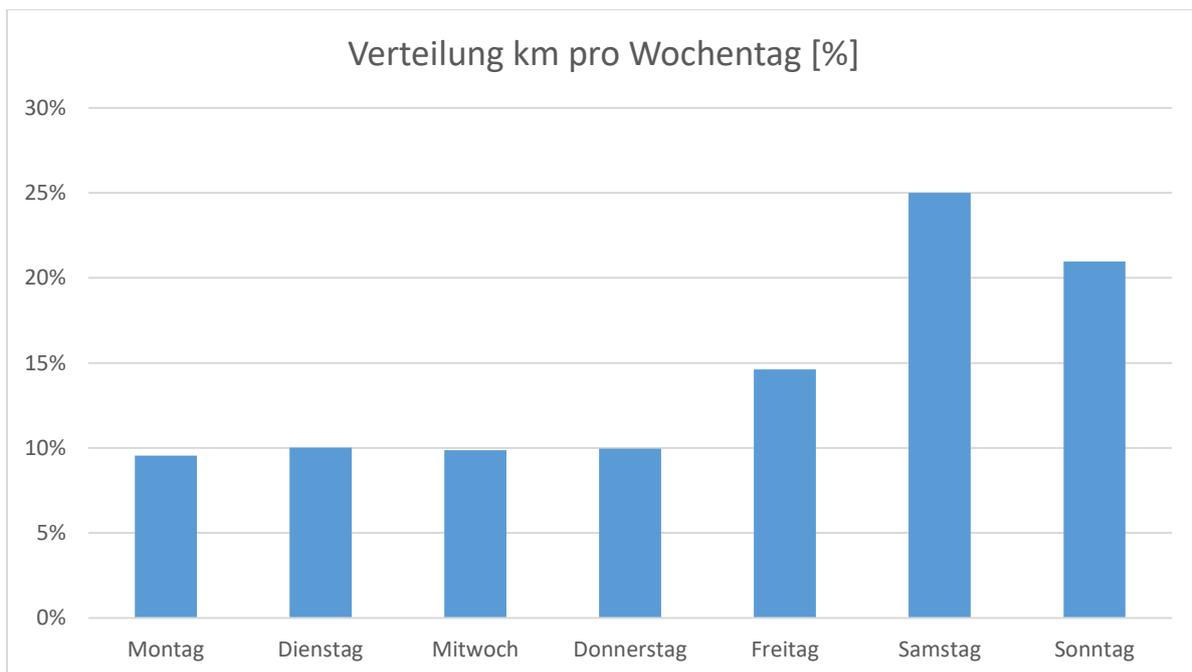


Abbildung 86: Verteilung Kilometer pro Wochentag

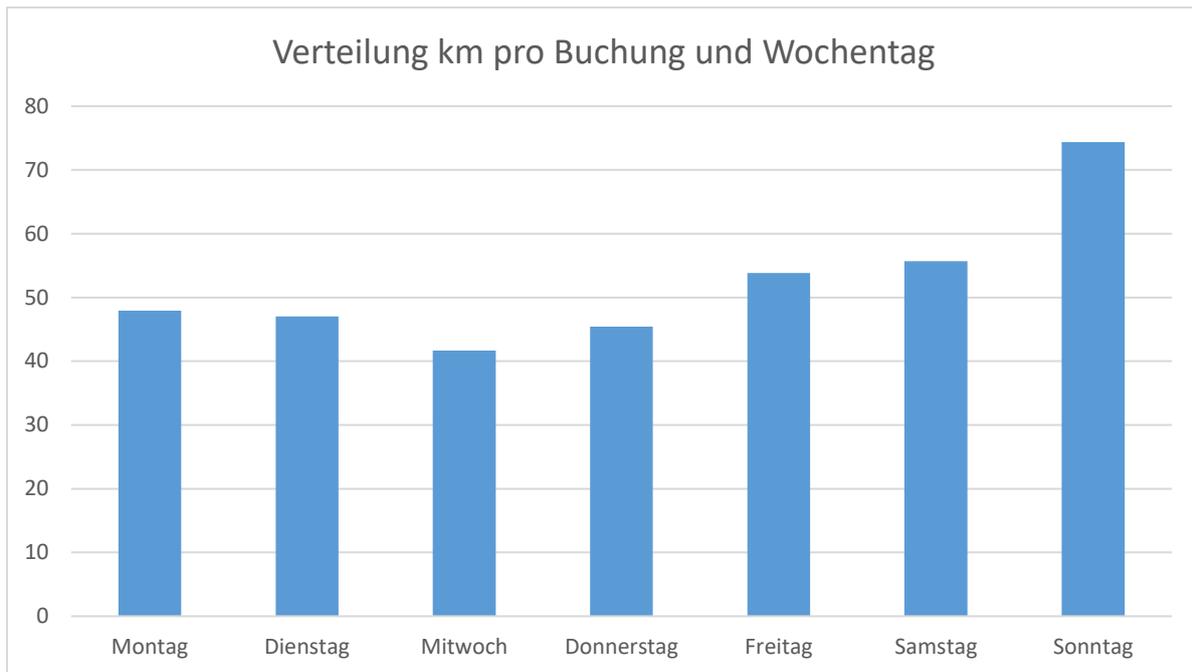


Abbildung 87: Fahrtstrecke pro Buchung nach Wochentagen

Am Sonntag wurden im Durchschnitt pro Buchung (72,48 km/ Buchung) die meisten Kilometer gefahren:

Häufigkeit länderübergreifender Fahrten

Um die Häufigkeit der länderübergreifenden Fahrten festzustellen, wurde eine Analyse der Fahrzeug-GPS-Daten und der Buchungsdaten (Zeitraum Juni 2017 – März 2018) durchgeführt. Dabei wurde auf die "Start" und "Stop" events (Motor ein und aus) durch die Telematiklösung der Fahrzeuge zurückgegriffen.

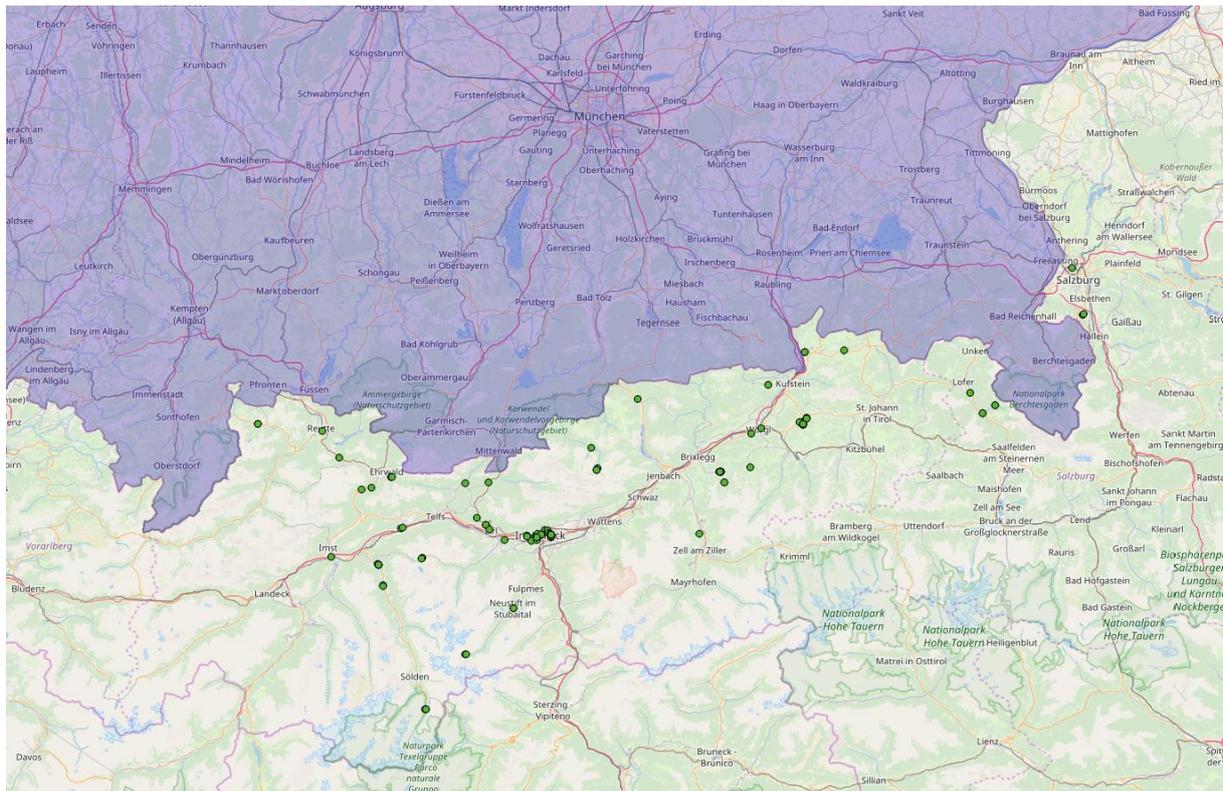


Abbildung 88: Destinationen außerhalb von Deutschland (grüne Punkte stellen Destinationen außerhalb Deutschlands dar; violett ist Deutschland)

Ca. 99% der Kundenfahrten wurden in Deutschland durchgeführt. Es gab nur wenige Fahrten ins Ausland, hierbei ausschließlich nach Österreich. Dabei gab es keine Kunden, die mehrmals mit dem Fahrzeug ins Ausland gefahren sind – es handelte sich immer um Einzelfahren.

Nutzererfahrung und -feedback bei erstem Tankvorgang

Im Rahmen einer qualitative Nutzerbefragung wurden Heavy User und Servicemitarbeiter befragt. Im Folgenden werden die gestellten Fragen, sowie die Antworten der 14 Befragten kurz zusammengefasst und deren Auswertung in Form von Diagrammen dargestellt und abschließend zusammengefasst erläutert. In manchen Fällen haben sich einige Befragten enthalten, sodass bei den Fragen 3 und 4 nicht alle möglichen 14 Antworten abgegeben und ausgewertet wurden.

Teilweise erfolgt eine Ermessung im Net Promoter Score (NPS), wenn es sinnvoll und möglich ist. Hierbei handelt es sich um eine Kennzahl, die mit dem Unternehmenserfolg korreliert. In diesem Forschungsvorhaben wurde NPS als Instrument zur Bewertung der Kundenzufriedenheit genutzt. Die Befragten konnten ihre Zufriedenheit mit einem Wert von 0 (sehr unwahrscheinlich) bis 10 (sehr wahrscheinlich) ausdrücken. Anhand der Antworten wird schließlich eine Kennzahl – der so genannte Net Promoter Score – errechnet, die dem Projektkonsortium einen Hinweis auf die Kundentreue und -zufriedenheit geben soll.

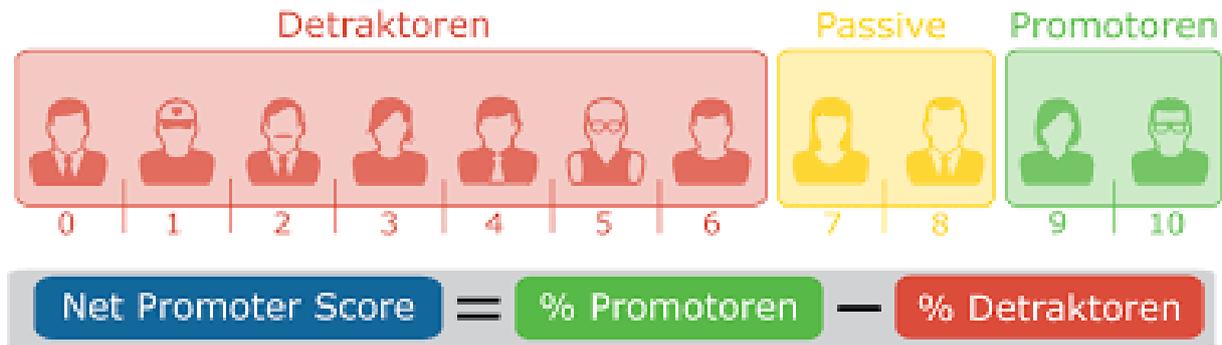


Abbildung 89: Einteilung der NPS-Zahlenskala in drei Stufen und die Definition des Net Promoter Scorers

•Kunden, die von **0 – 6** bewerten, sind sog. **Detraktoren**. Sie haben mit einer Dienstleistung bzw. einem Unternehmen negative Erfahrungen gemacht und geben diese auch weiter. Somit halten sie andere davon ab, bei Ihnen zu kaufen bzw. mit Ihnen zusammenzuarbeiten.

•Kunden, die Sie mit **7 oder 8** bewerten, sind sog. **Passive**. Sie sind die „Zufriedenen“, sprechen aber nicht darüber.

•Kunden, die Sie mit **9 oder 10** bewerten, sind sog. **Promotoren**. Diese konnten begeistert werden, sodass sie als Fürsprecher eine Empfehlung weitergeben.

Der NPS selbst ist die Differenz zwischen Promotoren in % und den Detraktoren in %. Ist der NPS positiv, so überwiegt die Anzahl der Promotoren, im negativen Fall die der Detraktoren. Generell ist ein NPS über 0 gut einzuschätzen, über 50 sogar als exzellent.

Im Rahmen der Umfrage wurden 10 Fragen definiert, um Informationen zum Betankungsvorgang zu erhalten:

Frage 1: „Was ist dein erster Gedanke, wenn du deine erste Betankung beschreiben sollst?“

- *Schnell* (Von 4 der 14 Befragten angegeben)
- *Einfach* (Von 7 der 14 Befragten angegeben)
- *Anstrengend* (Von einer befragten Person angegeben)
- *Kritisch* (Von 4 der 14 Befragten angegeben)

Frage 2 „Bewerten Sie bitte den Tankvorgang von sehr schwer (1) bis sehr einfach (10)“

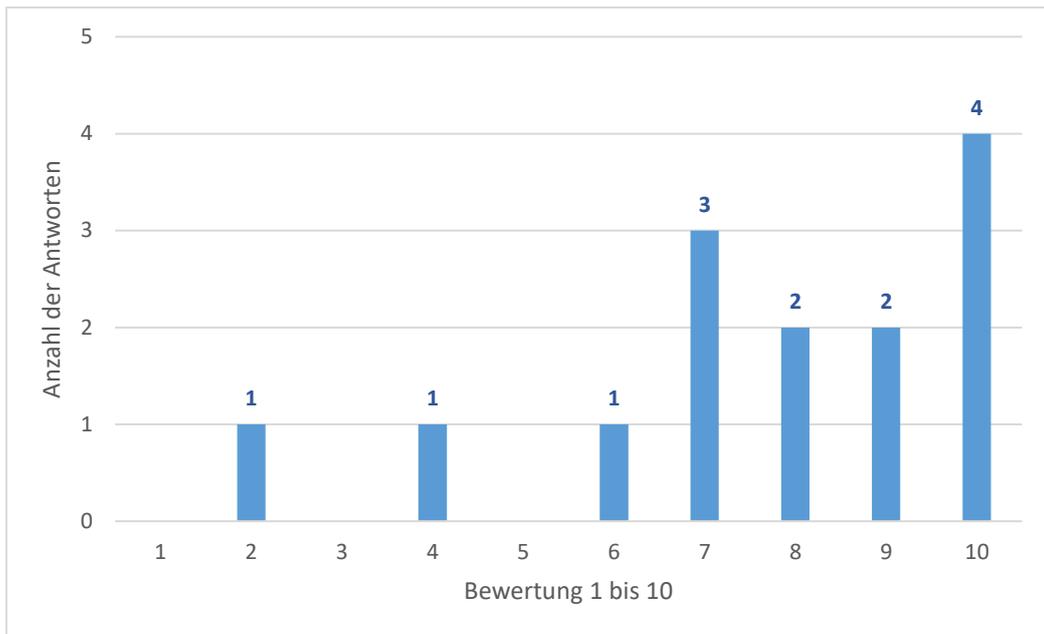


Abbildung 90: Einschätzung des Tankvorgangs (**Net Promoter Score: $6/14 - 3/14 = 21\%$**)

Die Mehrheit der Befragten schätzt den Tankvorgang als einfach bis sehr einfach ein. Vier Befragte haben sogar die „Bestnote“ gegeben. 60% gaben jedoch an, Probleme beim Tankvorgang zu haben. Am häufigsten wurden genannt:

- „Tankvorgang wurde oft abgebrochen“
- „Zapfhahn ist am PKW angefroren“

Frage 3: „Wie bewertest du die Bedienung der Tanksäule mit der CEP-Tankkarte? Von sehr schwer (1) bis sehr einfach (10)?“

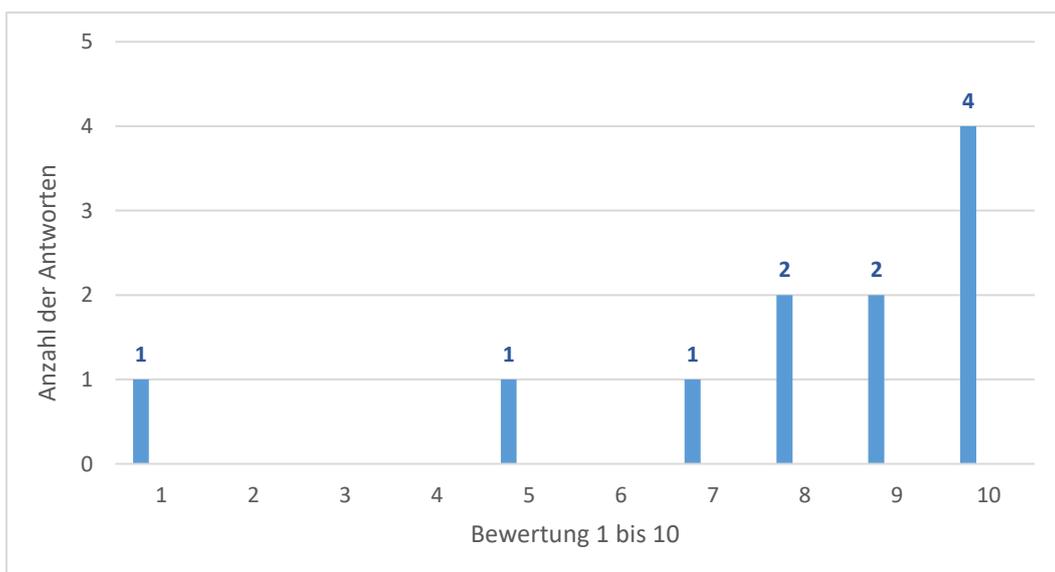


Abbildung 91: Einschätzung der Bedienung der CEP-Tankkarte (**Net Promoter Score: $6/11 - 2/11 = 36\%$**)

Frage 4: „Wie einfach war es, den Zapfhahn an das Fahrzeug anzukoppeln? Von sehr schwer (1) bis sehr einfach (10)“

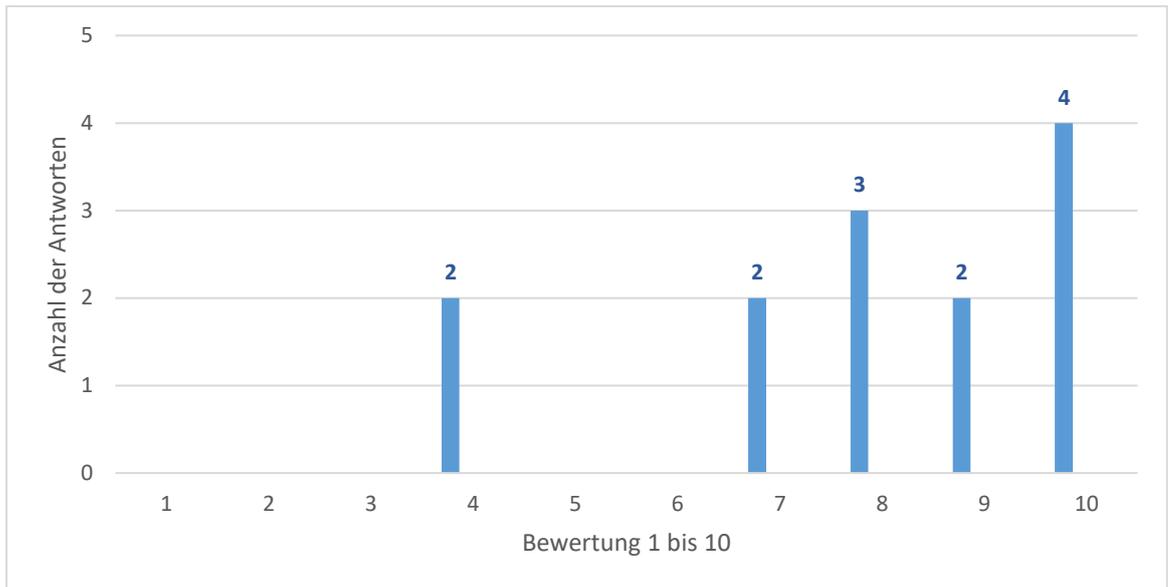


Abbildung 92: Einschätzung der Einfachheit den Zapfhahn anzukoppeln (**Net Promoter Score = $6/13 - 2/13 = 30\%$**)

Frage 5: Wie einfach war es, den Tankvorgang zu starten? Von sehr schwer (1) bis sehr einfach (10)

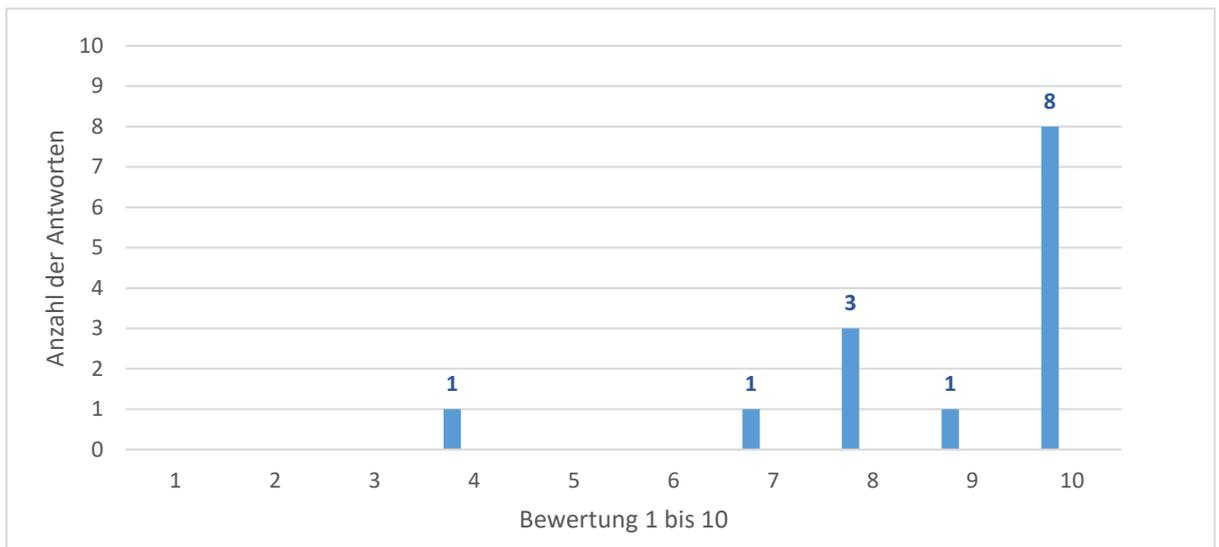


Abbildung 93: Einschätzung der Einfachheit den Tankvorgang zu starten (**Net Promoter Score: $9/14 - 1/14 = 57\%$**)

Frage 6: „Wie einfach war es, den Tankvorgang zu beenden? Von sehr schwer (1) bis sehr einfach (10)“

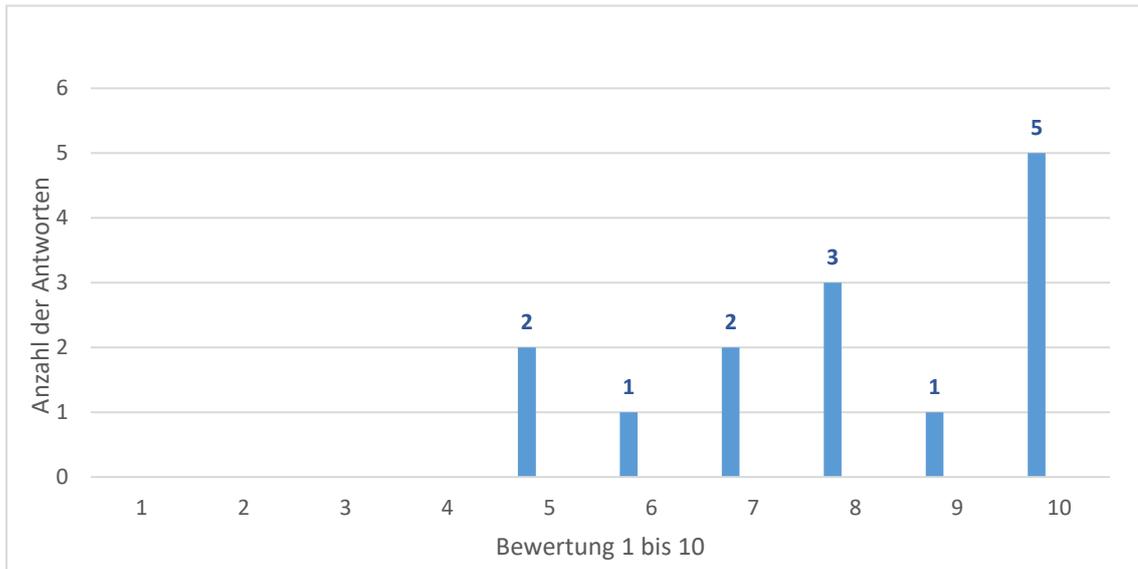


Abbildung 94: Einschätzung der Einfachheit den Tankvorgang zu beenden (**Net Promoter Score: $6/14 - 3/14 = 21\%$**)

Frage 7: „Wie zufrieden warst du mit der Betankungszeit? Von gar nicht zufrieden (1) bis sehr zufrieden (10)“

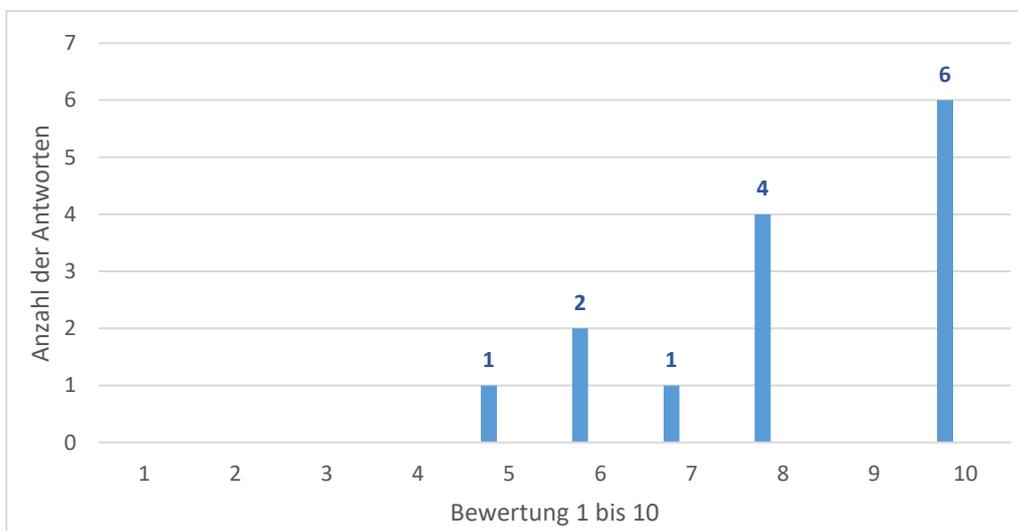


Abbildung 95: Einschätzung der Zufriedenheit mit der Betankungszeit (**Net Promoter Score = $6/14 - 3/14 = 21\%$**)

Frage 8: „Wie sicher hast du dich beim Tankvorgang gefühlt? Von gar nicht sicher (1) bis sehr sicher (10)“

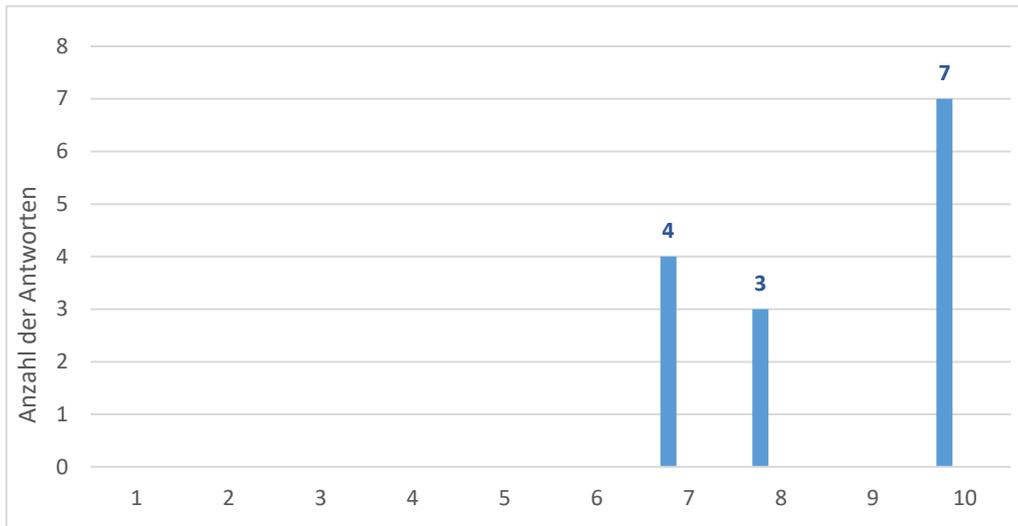


Abbildung 96: Einschätzung der Sicherheit beim Tankvorgang (**Net Promoter Score = 50%**)

Bei der Bewertung des Tankvorganges kommt die Mehrheit der Befragten zu einem positiven Fazit: Die Mehrheit empfindet den Tankvorgang als „einfach“ bis „sehr einfach“.

Die Mehrheit der befragten Personen hatte Probleme beim Betanken der Wasserstoffautos. Die Probleme beschränkten sich zumeist auf abruptes Abbrechen des Tankvorganges, sowie das Anfrieren des Zapfhahns an das Auto. Diese Probleme bereiteten jedoch zumeist keine größeren Umstände. Das BeeZero-Servicezentrum bzw. andere zuständige Akteure wurden hierbei oft zur Hilfe gerufen, sodass der Tankvorgang nach kurzer Zeit einfach fortgesetzt werden konnte.

Die Bedienung der Zapfsäulen mit Hilfe der CEP-Tankkarten wurde zumeist als „einfach“ bis „sehr einfach“ empfunden. Für manche der befragten Personen gab es durchaus Schwierigkeiten, die das Tanken mit der CEP-Tankkarte kritisch bzw. als schwer/kompliziert empfunden haben. Es ergibt sich hierbei ein Net Promoter Score von 36%

Das Ankoppeln des Zapfhahns an das Auto gestaltete sich für die Anwender zumeist „einfach“ bis „sehr einfach“. Jedoch zeichnet sich auch hier eine Unzufriedenheit mancher Befragten ab. Einige haben den Ankopplungsprozess eher als mäßig einfach eingestuft. Somit ergibt sich hier ein Net Promoter Score von 30%.

Allgemein wurde das Starten des Tankvorganges als einfach bewertet, wobei einige Befragten auch ein „wenig einfach empfunden“ als Antwort angaben. Das Beenden des Tankvorganges wurde von mitteleinfach bis sehr einfach bewertet, wobei hierbei der Trend zu „sehr einfach“ zu erkennen ist.

Die Zufriedenheit der Befragten mit der Betankungszeit lässt sich ebenfalls in mittel- bis sehr zufrieden einstufen. Hierbei ergibt sich ein Net Promoter Score von 21%. Die Betankungszeit wird also allgemein als „gut“ empfunden, jedoch könnte diese laut Feedback noch ausgebaut werden und schneller erfolgen.

Schließlich haben sich alle Befragten beim Tankvorgang sicher gefühlt. Hierbei ergibt sich ein Net Promoter Score von 50%.

Abschließend konnte der Tankvorgang mit Wasserstoff als angenehm und gut empfunden werden. Die vereinzelt auftretenden Probleme beim Tankvorgang konnten ohne größere Umstände behoben werden. Weiterhin wird das Starten, die Bedienung, sowie das Beenden des Tankvorganges für die Mehrheit der Befragten als „einfach“ bis „sehr einfach“ bewertet. Er steht also dem konventionellen Tankvorgang kaum noch nach und kann durchaus als unkompliziert beschrieben werden.

Zusammengefasst fallen die Umfrageergebnisse durchweg positiv aus. Alle Fragen weisen positive NPS auf, sodass die meisten Kunden als sog. Promotoren das Wasserstoff-Carsharing weiterempfehlen würden.

Dabei hat sich die Nutzung der NPS als positiv erwiesen. Für den Anwendungsfall stellte NPS ein einfaches und nützliches Instrument zur Bewertung der Kundenzufriedenheit im Bereich der Wasserstoffmobilität dar. Das Projektkonsortium spricht folglich eine Empfehlung für den weiteren Einsatz aus.

8) AP 3.8: Erforschung Optimierung Nutzerprofile/Fahrmuster

Das Profil des Endnutzers ist erfasst und charakterisiert worden, auch konnte sein Fahr- und Tankverhalten detailliert nachvollzogen werden. Im Rahmen einer qualitativen Befragung wurden Heavy User und das im Projekt eingesetzte Servicepersonal nach möglichen Hürden beim Tankvorgang befragt, um das Tanken zukünftig zu erleichtern. Folgende Punkte wurden genannt:

- „Sicherstellen, dass die Infos in der H2 Mobility App immer korrekt sind, sodass die Tankstelle und der Kartenleser auch wirklich funktionieren“
- „Es muss sichergestellt werden, dass auch bei Fehlern im System eine Betankung anderweitig sichergestellt wird“ (Grund: das sehr begrenzte Tankstellennetz)
- „Lösung im Winter nicht ganz zufriedenstellend. Tankstellen zeitnah auffüllen. Problematik bei zu hohen Temperaturen abschaffen.“
- „Ständiges Abrechnen des Tankvorganges in den Griff bekommen“
- „Optimierung der CEP-Tankkarte“

Die Forderung nach mehr Tankstellen wurde mehrfach angesprochen und spiegelt den größten Bedarf im Bereich der Wasserstoffmobilität wider.

Zusammenfassung

Das übergeordnete Ziel des Projektes „Linde Hydrogen Mobility Concept“ (LHMC) war die Ermittlung von Forschungserkenntnissen zu H₂-Mobilitätskonzepten im praktischen Einsatz. Die Grundlage hierzu bildete das Wasserstoff-Carsharing-Großexperiment „BeeZero“.

1) Forschungsvorhaben FCEV

Im Rahmen des Projekts konnte der erfolgreiche Einsatz von 50 wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenfahrzeugen gezeigt werden. Aus dem Flottenversuch wurden Informationen über ihren alltäglichen Einsatz gewonnen und zukünftige Verbesserungspotentiale abgeleitet.

Die im Projektverlauf dokumentierten Fahrzeugfehler konnten durch eine frühzeitige Fehlerindikation und zielführende Zusammenarbeit des Konsortiums auf 0 im Q2/2018 reduziert werden. Darüber hinaus wurde eine mit dem Fahrzeughersteller abgestimmte Wartungsstrategie in regelmäßigen Abständen durchgeführt.

Über den regulären Flotteneinsatz hinaus untersuchte der Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik eines der Flottenfahrzeuge auf dem Rollenprüfstand und in Realfahrten und konnte so detaillierte Informationen über das Systemverhalten des Fahrzeugs gewinnen. Aus den Erkenntnissen wurde anschließend eine Modellierung und Simulationsumgebung für Brennstoffzellenfahrzeuge abgeleitet und aufgebaut, die den Vergleich von BEV und FCEV zulässt und deren Ergebnisse bereits auf einer internationalen Konferenz veröffentlicht wurden.

2) Forschungsvorhaben H₂-Infrastruktur

Die Linde AG untersuchte auf der Grundlage durchgeführter Carsharing-Fahrten und der hierbei gesammelten Betankungsdaten, die örtliche Verteilung aller Tankvorgänge, das Tankverhalten der Nutzer und die Zuverlässigkeit der genutzten Tankstellen. Hinsichtlich der Tankstellenauswahl für die durchgeführten Betankungen, haben die Kunden auf die ihnen zur Verfügung stehende Infrastruktur in München zurückgreifen müssen, sodass die Tankstelle Detmoldstraße während der Projektlaufzeit am häufigsten genutzt wurde, gefolgt von der Kreillerstraße, die erst im Q3/2017 eröffnet wurde.

Bei der Auswertung der Betankungsdaten konnte identifiziert werden, dass 70% der im untersuchten Zeitraum durchgeführten Betankungen mit einer Einzelbetankung ausgeführt wurden. Die im Falle von Mehrfachbetankungen aufgetretenen Probleme konnten in Zusammenarbeit mit Servicedienstleistern schnell und effizient behoben werden. Darüber hinaus konnte ermittelt werden, dass die Mehrheit der Betankungen durch die Servicemitarbeiter von BeeZero jeweils am Wochenanfang (vor allem an Sonntagabenden und Montagen) durchgeführt wurde, was auf eine vermehrte Nutzung der Carsharing-Fahrzeuge an Wochenenden (u.a. Tagesausflüge, Fahrten zum Einkaufen oder Flughafenfahrten) hindeutet und somit den Kundenbedarf aufzeigt. Anzumerken ist, dass das Carsharing zu 99% für Fahrten innerhalb Deutschlands genutzt wurde. In einigen Ausnahmefällen wurden Fahrten nach Österreich unternommen.

Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen war die Erforschung der Zuverlässigkeit der genutzten H₂-Tankstellen, um Rückschlüsse auf den weiteren Entwicklungsbedarf zu ziehen. Hierbei zeigte sich, dass die geringe Anzahl an Tankstellen einen enormen Einfluss auf die Verfügbarkeit für Tankvorgänge hatte. So konnten die genutzten Carsharing-Fahrzeuge zum Teil bei geringer Verfügbarkeit der Tankstelle nicht ordnungsgemäß betankt werden und für die Kunden zur Verfügung stehen. Die Projektergebnisse verdeutlichen den im Bereich der wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellentechnologie notwendigen Ausbau der Tankstelleninfrastruktur, um eine Wende hin zu umweltfreundlichen Antriebstechnologien vollziehen zu können.

Das Projektkonsortium schätzt das Potential für einen Transfer der Ergebnisse auf andere deutsche Großstädte wie Berlin, Hamburg und Köln als sehr hoch ein. Das steht in enger Verbindung mit der notwendig höheren Auslastung der Wasserstofffahrzeuge: BeeZero standen aufgrund des Pilotcharakters des Projekts eine Flotte von 50 Fahrzeugen zur Verfügung. Folglich gab es zu wenige Buchungen, um von hoher wirtschaftlicher Attraktivität zu sprechen. Dies kann zum Beispiel durch die Steigerung der Attraktivität eines solchen Carsharings für Kunden erzielt werden. Mögliche Stellhebel sind hierbei:

- Preispolitik (günstiger als Wettbewerber)
- höhere Flexibilität (Freefloating anstelle von Roundtrips/Zonenmodell)
- weitere Assets/Vorteile für Kunden: „grüne“ Mobilität, Zusatzangebote zur Fahrzeugmiete etc.

Alternativ könnten FCEV-Fahrzeuge zukünftig in bestehende Carsharing-Dienste eingebracht werden, die bereits eine hohe Nutzungsquote aufweisen, um damit den erhöhten Invest für die Fahrzeuge schneller zu amortisieren.

Schließlich führte die TUM Analysen zur Auslegung der Wasserstoff-Infrastruktur für den Großraum München und für das deutsche Bundesgebiet durch, um eine langfristige Verbesserung der Abdeckung zu erzielen und den Betrieb von FCEV attraktiver zu gestalten. Als Ergebnis kann zusammengefasst werden, dass die Standortauswahl im städtischen Gebiet vor allem anhand sozio-demographischer Faktoren erfolgen sollte, während eine Auslegung für den Fernverkehr anhand von Verkehrsflüssen anzustreben ist. Das HRS-Netzwerk in Deutschland ist im globalen Vergleich bereits – gerade im Fernverkehr – gut ausgebaut, sodass FCEV problemlos durch das Land bewegt werden können. Für die alltägliche Individualmobilität mit größeren Kurzstreckenanteilen ist jedoch ein deutlicher Ausbau der Infrastruktur erforderlich, um die Distanz zum nächsten HRS-Standort zu verringern. Diese Ausbaumaßnahmen sind jedoch nur sinnvoll, sofern auch gleichermaßen die Anzahl der betriebenen FCEV in Deutschland steigt, um somit die Wirtschaftlichkeit der Infrastrukturstandorte sicherzustellen.

3) Forschungsvorhaben Endnutzer

Ein weiteres erreichtes Projektergebnis war die Erforschung der „Endnutzer“ und ihres Nutzerverhaltens. Neben der Altersstruktur und Geschlechterverteilung konnten somit spezifische Nutzungshintergründe anhand des Zielpunkt-Clusterings und Abgleich mit

POI-Daten identifiziert werden. Festzustellen ist, dass das Carsharing vor allem für Freizeitfahrten (Ausflüge, sportliche Aktivitäten, Gastronomie) und Einkaufsfahrten genutzt wurde.

Anhand von Umfragen wurden vier spezifische Kundensegmente („Lifestyler“, „LOHAS“, „Nerds“ und „LOVOS“) identifiziert. Als Vorteil wurde von ihnen insbesondere die unkomplizierte und emissionsfreie Idee des H₂-Carsharings hervorgehoben.

Eine vertiefte Analyse der BeeZero-Kunden zeigte auf, dass das Konzept auf großes Interesse gestoßen ist und Persönlichkeiten aus dem gesamten Münchner Stadtgebiet das Carsharing-Konzept genutzt haben. Die größte Herausforderung war dabei das Fehlen einer gut ausgebauten H₂-Tankstelleninfrastruktur. Dies zeigt ganz deutlich einen erforderlichen Ausbau der Tankstellen-Infrastruktur im gesamten Stadtgebiet auf.

Eine qualitative Umfrage von Nutzern und Stakeholdern der Wasserstoffmobilität zeigte einen hohen Mehrwert der Wasserstoffmobilität im Vergleich zu anderen Mobilitätskonzepten auf. Aufgrund des Nachhaltigkeitsaspekts wurde das Geschäftsmodells der Wasserstofftechnologie als eine echte Alternative zu konventionellen Technologien bezeichnet. Die Endnutzeranalyse hat ganz deutlich gezeigt, dass die Wasserstoffmobilität das Potential zur Marktreife hat. Als kritisch wurden die schlechte Tankstellenverfügbarkeit und die geringe Anzahl an entsprechenden Anbietern genannt. Bemerkenswert war, dass sich BeeZero-Nutzer verstärkt mit umweltfreundlichen alternativen Antriebssystemen auseinandersetzten – was auf einen Erfolg des Modells hindeutet.

Ebenfalls wurde das Tankverhalten der BeeZero-Flotte untersucht, um die Grundlage für die Planung zukünftiger Infrastrukturmaßnahmen im Tankstellenbereich zu ebnet. Die aufgetretenen Probleme beim Tankvorgang (hier waren vor allem ein abruptes Abbrechen des Tankvorganges, sowie ein Anfrieren des Zapfhahns als häufigste Ursachen zu nennen), konnten ohne große Umstände gelöst werden. Darüber hinaus wurde der Tankvorgang von den Nutzern als einfach und angenehm empfunden. Auch wurden die benötigte Betankungszeit und die Sicherheit positiv hervorgehoben. Der zur Bewertung der Kundenzufriedenheit eingesetzte Net Promoter Score (NPS) zeigte die Eignung für den Anwendungsfall der Wasserstoffmobilität auf.

Zusammengefasst lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Eine fehlende Infrastruktur (zu wenige Tankstellen und daraus resultierte zu große Entfernung zwischen den Tankstellen) und eine geringe Anzahl an verfügbaren Wasserstofffahrzeugen kann als das größte Hindernis für einen wirtschaftlichen Erfolg der Wasserstofftechnologie im deutschen Mobilitätssektor genannt werden.
- Funktionsfähigkeit der Tankstellen nicht ausreichend (Fehler bei 25% aller Betankungen; Störfälle und störfallbedingte Ausfälle von Tankstellen, die zu einer mangelnden Verfügbarkeit führen)
- zu kleine Fahrzeugflotte/Limitierung der Flotte
- räumliche Abdeckung im Münchner Stadtgebiet zu gering

- feste Rückgabepunkte mit Homezones und geforderte „Round-Trips“ führen zu geringer Flexibilität der Kunden, Optimierungsmöglichkeit: mehr Rückgabepunkte (flexiblere Rückgabemöglichkeiten nur bei größerer Flotte realistisch), Zusatzaufwand durch Service-Mitarbeiter zur Realisierung von free-floating Carsharing und Rückholung der Fahrzeuge in Gebiete mit hoher Nachfrage führt zu höheren Betriebskosten des Carsharing-Services

Das Projektkonsortium sieht auf der Grundlage der Forschungsergebnisse folgende Mobilitätskonzepte als zielführend an:

- Einsatz von FCEV im Bereich von Taxi- und Shuttleservices, wo ein hohes Fahrzeug- und Nutzeraufkommen sichergestellt ist (z.B. Einzel- oder Sammeltransfers zum Flughafen, ggf. Buchungen via App)
- Carsharing für Freizeit- und Wochenendaktivitäten in Deutschland und naheliegendes Umland, wo eine ausreichende H₂-Infrastruktur gegeben ist und längere Strecken zurückgelegt werden müssen.

III. Literaturverzeichnis

- [1] Hyundai Motor Deutschland GmbH, „Presse-Information: Hyundai ix35 Fuel Cell: Technische Daten,“ [Online]. Available: http://archiv.hyundai-presselounge.de/1347/-/files/ix35_fuelcell_2015_3_techn_daten_d8166f1.pdf. [Zugriff am 18 10 2018].
- [2] T. Klemm, „Hyundai Fuel Cell: Zukunft in Serie,“ [Online]. Available: https://www.autoberufe.de/fileadmin/user_upload/Hyundai_Fuel_Cell.pdf. [Zugriff am 10 09 2018].
- [3] L. H. C. GmbH, „BeeZero,“ [Online]. Available: <https://beezero.com/de>. [Zugriff am 03 10 2018].
- [4] M. Schuller, *Rollenprüfstands- und Realfahrversuche mit einem Brennstoffzellenelektrofahrzeug*, München: Technische Universität München, 2019.
- [5] Verband der Automobilindustrie e. V., „WLTP - Neues Testverfahren weltweit am Start: Fragen und Antworten zur Umstellung von NEFz auf WLTP,“ [Online]. Available: https://www.vda.de/dam/vda/publications/2017/WLTP_QundA_DE/WLTP_QA_DE.pdf. [Zugriff am 22 01 2019].
- [6] DieselNet, „FTP-75,“ [Online]. Available: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/ftp75.php>. [Zugriff am 19 02 2019].
- [7] DieselNet, „Common Artemis Driving Cycles (CADC),“ [Online]. Available: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/artemis.php>. [Zugriff am 19 02 2019].
- [8] D. Garcia, „Robust smoothing of gridded data in one and higher dimensions with missing values,“ *Computational statistics & data analysis*, Bd. 54, Nr. 4, pp. 1167-1178, 2010.
- [9] P. Rosner, *Experimentelle Analyse des Betriebsverhaltens eines Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuges*, München: Technische Universität München, 2019.
- [10] W. Schmid, L. Wildfeuer, J. Kreibich, R. Büechl, M. Schuller und M. Lienkamp, „A Longitudinal Simulation Model for a Fuel Cell Hybrid Vehicle: Experimental Parameterization and Validation with a Production Car,“ in *Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monaco, 2019.
- [11] M. J. Hodgson, „A Flow-Capturing Location-Allocation Model,“ *Geographical Analysis, Volume 22, Issue 3*, July 1990.
- [12] M. Kuby und S. Lim, „The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles,“ *Socio-Economic Planning Sciences, Volume 39, Issue 2*, pp. 125-145, June 2005.
- [13] S. Lim und M. Kuby, „Model, Heuristic algorithms for siting alternative-fuel stations using the Flow-Refueling Location,“ *European Journal of Operational Research, Volume 204, Issue 1*, pp. 51-61, July 2010.
- [14] T. H. Tran, G. Nagy, T. B. T. Nguyen und N. A. Wassan, „An efficient heuristic algorithm for the alternative-fuel station location problem,“ *European Journal of Operational Research, Volume 269, Issue 1*, pp. 159-170, August 2018.
- [15] I. Capar, M. Kuby, V. J. Leon und Y.-J. Tsai, „An arc cover-path-cover formulation and strategic analysis of alternative-fuel station locations,“ *European Journal of Operational Research, Volume 227, Issue 1*, pp. 142-151, May 2013.
- [16] J. G. Kim und M. Kuby, „The deviation-flow refueling location model for optimizing a network of refueling stations,“ *International Journal of Hydrogen Energy, Volume 37, Issue 6*, pp. 5406-5420, March 2012.
- [17] C. Upchurch, M. Kuby und S. Lim, „A Model for Location of Capacitated Alternative-Fuel Stations,“ *Geographical Analysis, Volume 41, Issue 1*, pp. 127-148, January 2009.
- [18] R. Bapna, L. S. Thakur und S. K. Nair, „Infrastructure development for conversion to environmentally friendly fuel,“ *European Journal of Operational Research, Volume 142, Issue 3*, pp. 480-496, November 2002.
- [19] J. M. Ogden, „Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study,“ *International Journal of Hydrogen Energy, Volume 24, Issue 8*, pp. 709-730, August 1999.
- [20] J. Brey, A. Carazo und B. R., „Analysis of a hydrogen station roll-out strategy to introduce hydrogen vehicles in Andalusia,“ *International Journal of Hydrogen Energy, Volume 39, Issue 8*, pp. 4123-4130, March 2014.
- [21] „Wasserstoffautos HyWay für Deutschland,“ *Wirtschaftwoche*, Nr. 9, p. 101, 2005.
- [22] M. Schwoon, „A tool to optimize the initial distribution of hydrogen filling stations,“ *Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 12, Issue 2*, pp. 70-82, March 2007.
- [23] P. Enzinger, *Entwicklung einer Methodik zur Auslegung eines flächendeckenden Wasserstoff-Tankstellennetzwerks für den Großraum München*, München: Technische Universität München, 2018.
- [24] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Verkehrsverflechtungsprognose 2030,“ [Online]. Available: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030.html>. [Zugriff am 31 05 2019].
- [25] T. Gallenberger, *Auslegung eines überregionalen Tankstellennetzes für Wasserstofffahrzeuge anhand der Analyse von Fahr- und Verkehrsdaten*, München: Technische Universität München, 2019.
- [26] A. Öser, *Analyse und Bewertung des endnutzerbezogenen Mobilitätsverhaltens von Carsharing-Fahrzeugen mit Brennstoffzellentechnologie*, München: Technische Universität München, 2019.
- [27] S. Schmöller, S. Weigl, J. Müller und K. Bogenberger, „Empirical analysis of free-floating carsharing usage: The Munich and Berlin case,“ *Transportation Research Part C Emerging Technologies, Volume 56*, pp. 34-51, July 2015.
- [28] B. Jäger, M. Wittmann und M. Lienkamp, „Agent-based Modeling and Simulation of Electric Taxi Fleets,“ in *6. Conference on Future Automotive Technology*, München, 2017.

- [29] Graphhopper, „Graphhopper Routing Engine,“ 2019. [Online]. Available: <https://github.com/graphhopper/graphhopper>. [Zugriff am 21 01 2019].
- [30] H. Becker, F. Ciari und K. W. Axhausen, „Modelling free-floating car-sharing use in Switzerland: A spatial regression and conditional logit approach,“ *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 81*, pp. 286-299, August 2017.
- [31] P. Kumar und M. Bierlaire, „Optimizing Locations for a Vehicle Sharing System,“ in *Proceedings of the Swiss Transport Research Conference*, Ascona, Switzerland, 2012.
- [32] infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, „Mobilität in Deutschland,“ 2009. [Online]. Available: www.mobilitaet-in-deutschland.de/. [Zugriff am 21 01 2019].
- [33] Landeshauptstadt München Referat für Stadtplanung und Bauordnung, *Mobilität in Deutschland (MiD). Alltagsverkehr in München, im Münchner Umland und im MVV-Verbundraum*, München, 2010.
- [34] infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH et al., „Mobilität in Deutschland 2008. Nutzerhandbuch,“ 2010. [Online]. Available: <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/mid2008-publikationen.html>. [Zugriff am 21 01 2019].
- [35] Landeshauptstadt München, „Indikatorenatlas München - Einwohnerzahl 2007,“ 2019. [Online]. Available: <http://www.mstatistik-muenchen.de/indikatorenatlas/atlas.html?indicator=i57&date=2007>. [Zugriff am 22 01 2019].
- [36] infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH et al., „Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht,“ 2010. [Online]. Available: <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/mid2008-publikationen.html>. [Zugriff am 21 01 2019].
- [37] ADAC e.V., „ADAC Autokosten Herbst/Winter 2018/2019,“ Oktober 2018. [Online]. Available: https://www.adac.de/_mmm/pdf/autokosteneuebersicht_47085.pdf. [Zugriff am 25 01 2019].
- [38] infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH et al., „Mobilität in Deutschland 2017: Kurzreport Verkehrsaufkommen - Struktur - Trends,“ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn, 2018.
- [39] K. Klemmer, C. Willing, S. Wagner und T. Brandt, „Explaining Spatio-Temporal Dynamics in Carsharing: A Case Study of Amsterdam,“ *22nd Americas Conference on Information Systems*, August 2016.
- [40] S. Wagner, T. Brandt, M. Kleinknecht und D. Neumann, „In Free-Float: How Decision Analytics Paves the Way for the Carsharing Revolution,“ in *Thirty Fifth International Conference on Information Systems*, Auckland, 2014.
- [41] A. Millard-Ball, G. Murray, J. T. Schure, C. Fox und J. Burkhardt, „Car-Sharing: Where and How It Succeeds,“ Transportation Research Board, Washington, D.C., 2005.
- [42] B. Conrad, „Brennstoffzellen-Autos für jedermann von Linde: BeeZero - Carsharing mit Wasserstoff,“ [Online]. Available: <https://www.auto-motor-und-sport.de/verkehr/brennstoff-zellenautos-linde-startet-carsharing-programm/>. [Zugriff am 04 10 2018].
- [43] M. Zacher, „Brennstoffzelle im Praxistest: Genial oder zum Scheitern verurteilt?: Carsharing mit Brennstoffzelle,“ [Online]. Available: https://www.focus.de/auto/elektroauto/bee-zero-abschied-vom-carsharing-mit-brennstoffzelle-seiner-zeit-voraus-beezero-stellt-car-sharing-sertvice-mit-brennstoffzellen-fahrzeugen-ein_id_9233843.html. [Zugriff am 04 10 2018].
- [44] Hyundai Motor Deutschland GmbH, „Der neue Hyundai ix35 Fuel Cell,“ 2015. [Online]. Available: https://www.hyundai.de/downloads/modell_prospekte/Hyundai-ix35-Fuel-Cell-Prospekt_Oktober.aspx. [Zugriff am 29 10 2018].
- [45] M. Klell, H. Eichlseder und A. Trattner, *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [46] M. Klöppel, W. Schmid und M. Lienkamp, „Agent-based Simulation of a Car-sharing System with Hydrogen-powered Vehicles,“ in *Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monaco, 2019.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	entfällt	2. Berichtsart	Schlussbericht
3a. Titel des Berichts	Linde Hydrogen Mobility Concept - Analyse, Bewertung und Modellbildung eines neuartigen Mobilitätskonzepts auf Basis von Brennstoffzellenfahrzeugen		
3b. Titel der Publikation	entfällt		
4a. Autoren des Berichts	Anatoly Davydov (Linde AG)	5. Abschlussdatum des Vorhabens	31.12.2018
	Werner Schmid (TUM)	6. Veröffentlichungsdatum	01.08.2019
4b. Autoren der Publikation	entfällt	7. Form der Publikation	entfällt
		9. Berichtsnummer der durchführenden Institution	entfällt
8. Durchführende Institution(en)	Linde AG, Technische Universität München (TUM)	10. Förderkennzeichen	03B10401
		11a. Seitenzahl Bericht	120
		11b. Seitenzahl Publikation	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Invalidenstr. 44,10115 Berlin		12. Literaturangaben	46
		14. Tabellen	19
		15. Abbildungen	99
16. Zusätzliche Angaben	keine	17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	BMVI, 28.06.2019
18. Kurzfassung: Übergeordnetes Ziel des Projektes LHMC war die Ermittlung von Forschungserkenntnissen über H2-Mobilitätscluster. Hierbei grenzte sich das Forschungsvorhaben klar von den bereits durchgeführten Carsharing-Aktivitäten ab, da es sich hierbei um das weltweit erste Carsharing -Konzept mit wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen handelte.			
19. Schlagwörter	Wasserstoff als Treibstoff, Wasserstoffinfrastruktur, Wasserstofftankstelle, Carsharing, FCEV, Fuel Cell Electric Vehicle		
20. Verlag	entfällt	21. Preis	entfällt

1. ISBN or ISSN	n.a.	2. Type of report	Final Report
3a. Report title	Linde Hydrogen Mobility Concept - Analysis, evaluation and modeling of a new mobility concept based on fuel cell vehicles		
3b. Title of the publication	n.a.		
4a. Author(s) of the report	Anatoly Davydov (Linde AG) Werner Schmid (TUM).	5. End of project	31.12.2018
		6. Publication date	01.08.2019
4b. Author(s) of the publication	n.a.	7. Form of publication	n.a.
		9. Originator's report no.	n.a.
8. Performing organization(s)		10. Reference no.	03B10401
		11a. No. of pages (report)	120
		11b. No. of pages (publication)	n.a.
13. Sponsoring agency Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Invalidenstr. 44,10115 Berlin		12. No. of references	46
		14. No. of tables	19
		15. No. of figures	99
16. Supplementary notes	none	17. Presented at (title, place, date)	BMVI, 28.06.2019
18. Abstract: The overall objective of the LHMC project was the identification of research findings on H2 mobility clusters. Here, the research project clearly distinguished itself from the car-sharing activities already carried out, since this was the world's first car-sharing concept with hydrogen-powered vehicles.			
19. Key words	Hydrogen as a fuel, hydrogen infrastructure, hydrogen refueling Station, Carsharing, FCEV, Fuel Cell Electric Vehicle		
20. Publisher	n.a.	21. Price	n.a.