

ECoMobility – Connected E-Mobility.

Vernetzte Elektromobilität am Beispiel der Technischen Universität Chemnitz

Björn Born, Madlen Günther, Benjamin Jacobsen, Benjamin Jähn,
Sebastian Müller-Blumhagen, Aniko Temmler und Jens Teuscher

Abschlussbericht

der Technischen Universität Chemnitz

zum Forschungsvorhaben:

ECoMobility – Connected E-Mobility

Vernetzte Elektromobilität am Beispiel der Technischen Universität Chemnitz

Antragsnummer: 100231948

Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2015 – 31.08.2018

Prioritätsachse: C – Investitionen in Bildung, Ausbildung und Berufsbildung für Kompetenzen und lebenslanges Lernen

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität Chemnitz

Straße der Nationen 62

D – 09111 Chemnitz

www.tu-chemnitz.de

Quelle:

Born, B., Günther, M., Jacobsen, B., Jähn, B., Müller-Blumhagen, S., Temmler, A., Teuscher, J. (2019). *ECoMobility – Connected E-Mobility. Vernetzte Elektromobilität am Beispiel der Technischen Universität Chemnitz*. Chemnitz: Universitätsverlag der Technischen Universität Chemnitz. ISBN 978-3-96100-082-1. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-327884>

ECoMobility – Connected E-Mobility. Vernetzte Elektromobilität am Beispiel der Technischen Universität Chemnitz.

Autorinnen und Autoren: Dipl.-Ing. Björn Born
M. Sc. Psych. Madlen Günther
M. Sc. Benjamin Jacobsen
M. Sc. Benjamin Jähn
M. Sc. Sebastian Müller-Blumhagen
M. Sc. Aniko Temmler
Dr. Ing. Jens Teuscher

Verlag / Ort: Universitätsverlag der Technischen Universität Chemnitz /
Chemnitz

Erscheinungsjahr: 2019

ISBN: 978-3-96100-082-1

URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-327884>



Das Werk - ausgenommen Zitate, Cover, Logo TU Chemnitz und Bildmaterial im Text - steht unter der Creative-Commons-Lizenz

Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur des Projektes ECoMobility.	10
Abbildung 2: Vernetzung der Universitätsteile durch ECoMobility.	12
Abbildung 3: Kommunikationsstruktur zwischen Server, WebApp, BEVs und Ladeinfrastruktur.	14
Abbildung 4: Logische Struktur der Server Anwendung.	15
Abbildung 5: Verlauf einer Buchung über die ECoMobility WebApp.	16
Abbildung 6: Schematische Darstellung des Datenloggers und der Zugangskontrolle.	18
Abbildung 7: Exemplarischer Graph.	20
Abbildung 8: Prinzip MapMatching.	21
Abbildung 9: Optimierte Struktur der Cloud Server Anwendung.	22
Abbildung 10: Übersicht Ladesystem.	27
Abbildung 11: Auswirkung der Leistung und Kapazität eines Speichers auf den zur Aufladung der Elektrofahrzeuge genutzten Anteil erneuerbarer Energien.	30
Abbildung 12: Anteil der erneuerbar erzeugten Energie an der Ladeenergie der Fahrzeuge.	38
Abbildung 13: Anteil der erneuerbar erzeugten Energie an der Ladeenergie der Fahrzeuge, bei direkter Optimierung der Ladezeitpunkte der Fahrzeuge.	39
Abbildung 14: Anteil und Häufigkeiten der im Projekt teilnehmenden Probanden hinsichtlich deren Beschäftigungsgruppe und -ort.	42
Abbildung 15: Erhebungszeitpunkte und eingesetzte Methoden der Nutzerstudie.	43
Abbildung 16: Anzahl (orange) und Distanz (blau) zurückgelegter Fahrten pro Nutzungstag im Erhebungszeitraum.	45
Abbildung 17: Räumliche Verteilung der zurückgelegten Strecken mit den BEVs im Studienzeitraum.	46
Abbildung 18: Räumliche Verteilung der zurückgelegten Strecken mit den Pedelecs im Studienzeitraum.	46
Abbildung 19: Zustimmungswerte zu den einzelnen Systemkomponenten des ECoMobility-Systems.	47
Abbildung 20: Akzeptanzbewertungen hinsichtlich des ECoMobility-Systems zwischen Nutzern und Nichtnutzern über eine Nutzungszeit von 6 Monaten.	49

Abbildung 21: Auszüge aus der Statistikseite zur Motivation der Verkehrsmittelwahl (links) und zum energieeffizienten Fahrverhalten mit BEVs (rechts).	50
Abbildung 22: Auszüge aus der Statistikseite zur Motivation der Verkehrsmittelwahl (links) und zum energieeffizienten Fahrverhalten mit BEVs (rechts).	52
Abbildung 23: Nutzung von Sharing Angeboten durch die Probanden.	55
Abbildung 24: Die sieben wichtigsten Kriterien bei der Kaufentscheidung für ein Elektrofahrzeug.	56
Abbildung 25: Gründe für den Nicht-Umstieg auf Elektromobilität.	56
Abbildung 26: Auswahl der Einschätzung der Potentiale der Geschäftsmodelle vernetzter Mobilität.	57
Abbildung 27: Auswahl der Einschätzung der Potentiale der Ladekonzept-Geschäftsmodelle.	58
Abbildung 28: Durchschnittsgeschwindigkeit in europäischen Städten mit dem PKW [17].	59
Abbildung 29: Mobilitätskosten der Mobilitätsarten in Abhängigkeit der jährlichen Dienstwegelänge mit Opportunitätskosten.	60
Abbildung 30: Verlauf der Ein- und Auszahlungen sowie des Kapitalwertes im Trendszenario bei Leasing der Fahrzeuge.	62
Abbildung 31: Vergleich der für neutralen Kapitalwert notwendigen Fahrtpreise bei exklusiver Nutzung durch Geschäftskunden.	63
Abbildung 32: Vergleich der für neutralen Kapitalwert notwendigen Fahrtpreise bei Öffnung des Systems für Privatnutzer.	63
Abbildung 33: Verlauf der Ein- und Auszahlungen sowie des Kapitalwertes im Trendszenario bei Combined Corporate Carsharing und Kauf der Fahrzeuge ohne Einbezug eines Speichers.	65
Abbildung 34: Verlauf der Ein- und Auszahlungen sowie des Kapitalwertes im Trendszenario bei Combined Corporate Carsharing und Kauf der Fahrzeuge unter Einbezug eines Speichers.	65
Abbildung 35: Verlauf der Ein- und Auszahlungen sowie des Kapitalwertes im Trendszenario bei Combined Corporate Carsharing und Kauf der Fahrzeuge unter Einbezug eines Speichers und Angebot der Fremdfahrzeugladung sowie Schnellladung.	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Szenarien in Bezug auf alle Parameter (in Prozent).	33
Tabelle 2: Reihenfolge der Szenarien nach ihrer Vorteilhaftigkeit.	34
Tabelle 3: Übersicht kritischer Werte zur Generierung von Vorteilhaftigkeit von ÖPNV- und Pedelecnutzung gegenüber der Mobilität mit E-PKW.	61
Tabelle 4: Vergleich der Mobilitätskosten mit dem und ohne das ECoMobility-System [22] auf innerstädtischen Dienstwegen.	61
Tabelle 5: Übersicht der Kapitalwerte des Corporate E-Carsharing.	62
Tabelle 6: Übersicht der Kapitalwerte des Combined Corporate Carsharing.	63

Inhaltverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	3
TABELLENVERZEICHNIS.....	5
INHALTVERZEICHNIS	6
1 ZIELSTELLUNG DES PROJEKTS	9
1.1 PROJEKTHINTERGRUND	9
1.2 PROJEKTSTRUKTUR.....	10
1.3 AUSGANGSLAGE.....	12
2 FORSCHUNGSBEREICH E-CONNECTED.....	13
2.1 ZIELSTELLUNG/AUSGANGSLAGE	13
2.2 UMSETZUNG	14
2.2.1 <i>Der zentrale Cloud Server</i>	15
2.2.2 <i>WebApp</i>	16
2.2.3 <i>Ladesäulen Steuerungssoftware</i>	17
2.3 METHODEN DER DATENERHEBUNG UND ALGORITHMIERUNG.....	17
2.3.1 <i>Zugangssystem und Datenaufzeichnung BEVs</i>	17
2.3.2 <i>Klassifikation des Fahrstils</i>	19
2.3.3 <i>Routing und Map Enhancement</i>	20
2.4 ERGEBNISSE.....	21
2.4.1 <i>Serverarchitektur</i>	21
2.4.2 <i>Betrieb, Erweiterung und Wartung der WebApp</i>	23
2.4.3 <i>Gründe für Wartungsarbeiten</i>	23
2.4.4 <i>Zusammenspiel zwischen Ladesäulensteuerung und WebApp</i>	24
2.4.5 <i>Fahrzeugzugang</i>	24
2.4.6 <i>Neuronales Netz</i>	24
2.4.7 <i>Routing und Map Enhancement</i>	25
3 FORSCHUNGSBEREICH ECOLOGICAL	26
3.1 ZIELSTELLUNG/AUSGANGSLAGE	26
3.2 UMSETZUNG	27
3.2.1 <i>Eingangsdaten für die Ladesystemsimulationen</i>	27
3.2.2 <i>Modellierung der Speicherparameter</i>	29

3.3	EINGESETZTE METHODEN	31
3.4	ERGEBNISSE	31
3.4.1	<i>Entwicklung von Betriebsstrategien der stationären Energiespeichereinheiten</i>	31
3.4.2	<i>Vergleich der Ladeverfahren</i>	33
3.4.3	<i>Simulation des Ladesystems mit angepasster Ladesteuerung</i>	35
3.4.4	<i>Darstellung und Bewertung der Ergebnisse</i>	38
3.4.5	<i>Überprüfung des Einsatzes stationärer Speicher</i>	39
4	FORSCHUNGSBEREICH ECO-TYPE ADAPTIVE	40
4.1	ZIELSTELLUNG/AUSGANGSLAGE	40
4.2	UMSETZUNG	41
4.2.1	<i>Probandenrekrutierung</i>	41
4.2.2	<i>Studiendesign</i>	42
4.3	EINGESETZTE METHODEN	43
4.4	ERGEBNISSE	44
4.4.1	<i>Prozess der Datenaufbereitung</i>	44
4.4.2	<i>Mobilitäts- und Nutzungsverhalten</i>	45
4.4.3	<i>Nutzerbewertung</i>	47
4.4.4	<i>Anreizgestaltung</i>	49
4.4.5	<i>Routingstudie</i>	52
5	FORSCHUNGSBEREICH ECONOMIC	54
5.1	ZIELSTELLUNG/AUSGANGSLAGE	54
5.2	UMSETZUNG	54
5.3	EINGESETZTE METHODEN	54
5.4	ERGEBNISSE	55
5.4.1	<i>Befragung zur Nutzung und Bewertung von Sharing-Diensten</i>	55
5.4.2	<i>Bewertung der Potentiale von Geschäftsmodellen</i>	57
5.4.3	<i>Bewertung der innerstädtischen Mobilität von Universitätsmitarbeitern</i> ...	59
5.4.4	<i>Übertragung der Ergebnisse auf Geschäftsmodelle der Elektromobilität</i>	62
5.4.5	<i>Zahlungsbereitschaft der Nutzer</i>	64
5.4.6	<i>Bewertung eines Batteriespeichers für regenerativ erzeugte Energie</i>	64
5.4.7	<i>Empfehlungen für die Ausgestaltung von Geschäftsmodellen</i>	66

6 DISKUSSION UND AUSBLICK	68
LITERATURVERZEICHNIS	70

1 Zielstellung des Projekts

Im Rahmen des Projektes ECoMobility – Vernetzte Elektromobilität an der TU Chemnitz erfolgte im Zeitraum von September 2015 bis August 2018 die Konzeption, Umsetzung und Evaluation eines multimodalen nachhaltigen Mobilitätskonzeptes am Beispiel der TU Chemnitz. Als Einstieg in den Forschungsbericht wird zunächst über den Projekthintergrund, der abgeleiteten Zielstellung sowie der Ausgangssituation am Beispiel der TU Chemnitz informiert.

1.1 Projekthintergrund

Auf dem Weg zu einer CO₂-armen, dem Klimawandel standhaltenden und ressourcenschonenden Gesellschaft stellt der Mobilitätssektor einen wichtigen Faktor dar. Die Elektromobilität kann hierbei einen entscheidenden Beitrag leisten. Aufgrund der mit Elektrofahrzeugen verbundenen Randbedingungen (geringe Reichweite, fehlende Ladeinfrastruktur) wird dies kurz- und mittelfristig aber nur durch eine intelligente Vernetzung mit anderen Mobilitätsträgern, der Infrastruktur und der Verkehrsteilnehmer untereinander gelingen. Eine intelligente Vernetzung der Mobilitätsakteure inklusive der genutzten Infrastruktur bietet enormes Potenzial für die effektive, effiziente und nachhaltige Nutzung von knappen Ressourcen wie Energie und Verkehrsraum.

Mobilität genießt in der heutigen Gesellschaft einen immer höheren Stellenwert und ist in sämtlichen Altersgruppen wichtiger denn je [1]. Dabei wird der Mobilitätssektor durch die Ressourcenverknappung und den Klimawandel aufgrund von Treibhausgasemission beeinflusst und beeinflusst diese ebenfalls. So verursacht der Verkehrssektor laut statistischem Bundesamt etwa 20% der CO₂-Emissionen in Deutschland [2]. Um diese Herausforderungen zu adressieren, wurden in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von Lösungsansätzen zu neuen Mobilitätskonzepten beforscht. Elektromobilität und Car-Sharing-Programme befinden sich bereits in der Anwendung; sind dabei für sich genommen aber immer noch Insellösungen. Wesentliches Potential zur Reduktion des aktuellen CO₂-Ausstoßes bietet daher auch die Vernetzung dieser Komponenten mittels Informations- und Kommunikationstechnik zu neuartigen Mobilitätskonzepten, welche wirtschaftlich betrieben werden müssen.

1.2 Projektstruktur

Der Fokus des Projekts ECoMobility liegt auf vernetzter Elektromobilität als nachhaltiges Konzept für die Mobilität der Zukunft [3, 4]. Hierbei ist das Ziel die Entwicklung, Vernetzung und Evaluation innovativer Lösungen in vier interdependenten Schwerpunktbereichen:

Im Bereich **ECo-type adaptive** soll die Frage beantwortet werden, wie Personengruppen mit unterschiedlichen Mobilitätsstilen durch Anreize gezielt zu sparsamem, situations- und energieangepasstem Mobilitätsverhalten innerhalb eines vernetzten Mobilitätskonzepts motiviert werden können. In **ECological** werden innovative Lösungen zur Bereitstellung von Energie an Ladepunkten und zur effektiven Nutzung des Verkehrsraums erarbeitet, welche die gegenläufigen Anforderungen von gesteuertem Laden und geteilter Nutzung erfüllen. Der Bereich **E-Connected** beschreibt die Systemintegration des Gesamtsystems. Dabei werden die in den verschiedenen Teilbereichen angewendeten Modelle und die aufgenommenen Daten miteinander verbunden und Synergien genutzt. Im Schwerpunkt **Economic** werden die Wirtschaftlichkeit innovativer vernetzter Geschäftsmodelle aus der Sicht aller beteiligten Akteure untersucht und tragfähige Geschäftsmodelle zur Realisierung des Gesamtsystems entwickelt. In Abbildung 1 ist die Projektstruktur veranschaulicht.

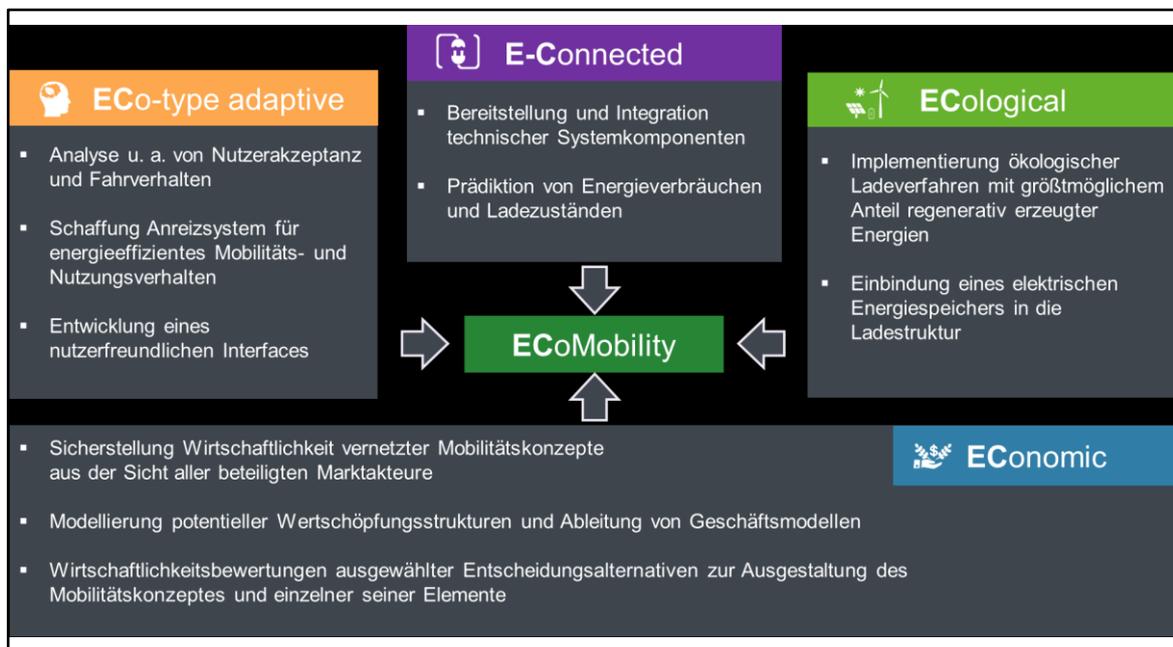


Abbildung 1: Struktur des Projektes ECoMobility.

Der nutzerzentrierte Themenschwerpunkt **ECo-type adaptive** adressiert den Einsatz nutzerangepasster Anreize zur system- und CO₂-optimalen Verkehrsmittelnutzung, eine in hohem Maße akzeptierte Systemgestaltung hinsichtlich der Ausstattung/Verfügbarkeit von Fahrzeugen sowie ein verständliches, nutzerfreundliches Interface, das flexibel auf variable Systemzustände anpassbar ist.

Darüber hinaus wird angestrebt, ein Mobilitätskonzept zu entwickeln, das auf Basis der regional vorhandenen unterschiedlichen Energieressourcen eine bestmögliche CO₂-Bilanz im Energieverbrauch aufweist. Dies soll u.a. dadurch gelingen, indem Elektrofahrzeuge zum optimalen Zeitpunkt, im Hinblick auf Ökostromerzeugung und Energiebedarf, geladen werden. Die Erfüllung dieses Ziels ermöglichen die Beiträge aus dem Schwerpunktbereich **ECological**: die Integration aller relevanten Systemparameter zu einem eindeutigen Systemzustand sowie die gezielte Steuerung systemverändernder Eingriffe, eine präzise Verbrauchsprognose aus Kenntnis der Buchungen und Nutzer und eine nach Erzeugung und Nachfrage regenerativer Energie optimierte Ladesteuerung mit flexibler Speichernutzung.

Ergänzend hierzu werden die verschiedenen Bestandteile des Mobilitätssystems miteinander vernetzt, die verschiedenen Modelle der einzelnen Schwerpunktbereiche miteinander gekoppelt und die aufgenommenen Daten gemeinsam analysiert. Diese Arbeiten entstehen im Schwerpunktbereich **E-Connected**. Neben der Integration der einzelnen Systemkomponenten steht zudem eine detaillierte Datenauswertung aus den anderen Schwerpunktbereichen hier im Fokus.

Das Konzept soll wirtschaftlich betrieben werden, da es eine hohe Auslastung und geringe Standzeiten der Fahrzeuge im System anstrebt: viele Menschen nutzen wenige Fahrzeuge. Diese Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit bildet den vierten Schwerpunkt: **Economic**. Sie wird erreicht durch eine wirtschaftliche Bewertung und Gestaltung der Systemkomponenten inklusive deren Zusammenwirken sowie die Entwicklung tragfähiger Geschäftsmodelle für die beteiligten Marktakteure.

1.3 Ausgangslage

Die TU Chemnitz verteilt sich über das Stadtgebiet Chemnitz an vier Standorten, wie in Abbildung 2 dargestellt. Die vier Standorte sind mit dem ÖPNV miteinander verbunden. Zudem sind an allen vier Standorten Ladesäulen installiert. An diesen Ladesäulen stehen jeweils ein E-Smart Fortwo als Battery Electric Vehicle (BEV) sowie zwei E-Bikes (Pedelecs) zur Verfügung.

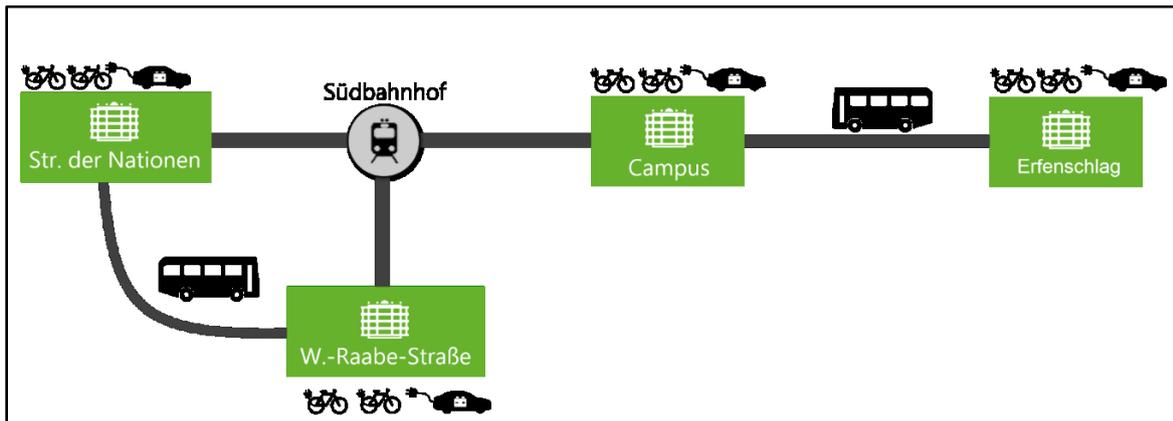


Abbildung 2: Vernetzung der Universitätsteile durch ECoMobility.

Die Mitarbeiter der TU Chemnitz konnten mit Hilfe einer Online-Buchungsplattform ihren notwendigen Dienstweg buchen. Bei der Buchung wurden den Mitarbeitern die verschiedenen aktuell zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel gezeigt. Fiel die Wahl auf die Nutzung des ÖPNV, so wurde dem Mitarbeiter neben der Angabe der Verbindungsmöglichkeiten zudem ein Handyticket bereitgestellt. Bei der Wahl des Pedelecs wurde bei Antreten der Dienstreise der elektronische Code des Fahrradschlösses dem Mitarbeiter angezeigt. Die Nutzung der BEV erfolgte mit Hilfe des RFID-Chips des Mitarbeiterausweises. Dieser wurde für die entsprechende Fahrt freigeschaltet. Damit konnte der Mitarbeiter neben der Authentifizierung an der Ladesäule auch einen Zugang zu den BEV erhalten. Bei Rückgabe der BEV wurde der Mitarbeiterausweis entsprechend wieder gesperrt. Dieses beschriebene Mobilitätssystem wurde im Vorgängerprojekt "fahrE" [5] entwickelt und im Projekt ECoMobility weiterentwickelt.

2 Forschungsbereich E-Connected

Das Kapitel E-Connected gibt einen Überblick über die Integration der technischen Komponenten in das Gesamtsystem ECoMobility. Im Unterkapitel Zielstellung und Ausgangslage soll eine Einordnung in das Gesamtsystem erfolgen. Weiterhin wird beschrieben, auf welche Vorarbeiten zurückgegriffen werden konnte und welche einzelnen Systemkomponenten zur Umsetzung notwendig waren. Es wird sowohl auf die Dateninfrastruktur eingegangen als auch auf die Verwaltungsstruktur im Hintergrund. Kapitel 2.2 stellt alle Komponenten des Systems vor und beschreibt deren Implementierung bzw. Integration. Abschließend erfolgt die Darstellung und Bewertung der erzielten Ergebnisse im Forschungsbereich E-Connected.

2.1 Zielstellung/Ausgangslage

Das Teilprojekt E-Connected hatte zur Zielsetzung den Zugang zum ECoMobility-Systems mittels einer Applikation (WebApp) jedem interessierten Mitarbeiter der TU Chemnitz barrierefrei bereitzustellen. Der Zugang zu den Fahrzeugen sollte möglichst ohne tiefgreifende technische Kenntnisse erfolgen können, um keine Mitarbeitergruppen (z.B. Mitarbeiter ohne Smartphone) zu benachteiligen. Als zweite Zielstellung sollte die Verknüpfung aller Fahr- und Messdaten erfolgen, um übergreifende Analysen zu ermöglichen. Das Fahrverhalten mit den Elektrofahrzeugen und die realen Messwerte zur verbrauchsorientieren Parametern standen dabei im Vordergrund. Basierend auf einer Klassifikation des Fahrverhaltens der Nutzer und den zur Verfügung stehenden Kartendaten (OSM-Daten; Open Street Map) sollte eine Möglichkeit zur Steigerung der Energieeffizienz beim Fahren mit Elektrofahrzeugen geschaffen werden.

Der Ausgangspunkt für dieses Projekt bildeten Ergebnisse aus dem vorhergehenden Projekt fahrE [5]. Die vorhandenen Komponenten im Bereich des online Front- und Backends waren die grundlegende Datenbankstruktur, eine anzupassende Buchungslogik sowie ein grafisches Frontend für die Nutzer und Administratoren. Für die Fahrzeuge erfolgten eine Weiternutzung der Zugangskontrolle und eine Adaption des vorhandenen Keyless-Go Systems. Als weiteren Kernbestandteil des Systems verfügt jeder Universitätsstandort über eine Ladesäule mit einer an das eigene Buchungssystem angepassten Software. Somit steht dem Nutzer an jeder Systemkomponente ein einheitliches und intuitives Bedienkonzept zur Verfügung. Die bestehenden Komponenten mussten zum Teil erheblich modifiziert sowie einige Teile neu entwickelt werden.

Folgende neue Komponenten wurden integriert:

- Datenlogger für BEVs mit CAN Bus-Anbindung
- Datenlogger für Pedelecs
- Erweiterung der Datenbank für anfallende Messwerte
- Frontend der WebApp und Ladesäulensoftware
- Weiterentwicklung und Anpassung des Backends (Server Applikation)
- Klassifikationsalgorithmus zur Fahrdatengruppierung mit BEVs
- Routingalgorithmus für ein energieeffizientes Routing mit BEVs

2.2 Umsetzung

Für die Umsetzung erfolgte die Weiterentwicklung und Neujustierung von vier zentralen Systemkomponenten (s. Abbildung 3):

- dem zentralen Server, der als Backend alle Buchungen verwaltet
- dem Frontend, welche die Schnittstelle zwischen dem Anwender und dem System darstellt
- den Ladesäulen und deren Steuerungssoftware
- dem schlüssellosen Zugangsberechtigungssystem zu den BEVs



Abbildung 3: Kommunikationsstruktur zwischen Server, WebApp, BEVs und Ladeinfrastruktur.

2.2.1 Der zentrale Cloud Server

Der Server stellt die zentrale Steuerungseinheit des Gesamtsystems dar. Durch kontinuierliche Statusupdates der anderen Komponenten erhält er immer einen vollständigen Systemüberblick und kann bestimmen, welche Ressourcen wann zur Verfügung stehen. Zudem managt und verarbeitet er die Buchungen der Nutzer. Die Serveranwendung lief während des Projekts auf einem Windows basierten, dedizierten Virtual-Private-Server-Host (VPSH) des Universitätsrechenzentrums der TU Chemnitz. Die Anwendung selbst war in der Programmiersprache C# geschrieben und bedient sich zur sicheren und langfristigen Speicherung des Systemzustandes sowie der Buchungs- und Systemdaten einer PostgreSQL Datenbank. Um Lesezugriffe auf die Datenbank zu beschleunigen wurden häufig verwendete Daten zudem in einem Systemcache vorgehalten. Als Schnittstelle zu den anderen Komponenten wurde das Webdienstframework ServiceStack verwendet. ServiceStack abstrahiert die öffentliche Schnittstelle der Serveranwendung in einer Art und Weise, sodass Anfragen an das System mit einer Vielzahl gängiger und weit verbreiteter Formate (XML, JSON, SOAP; etc.) gestellt werden können (siehe

Abbildung 4). Die peripheren Systemkomponenten können dadurch über sogenannte Remote-Procedure-Calls (RPCs) auf die Dienstschnittstellen zugreifen und somit mit dem System interagieren.

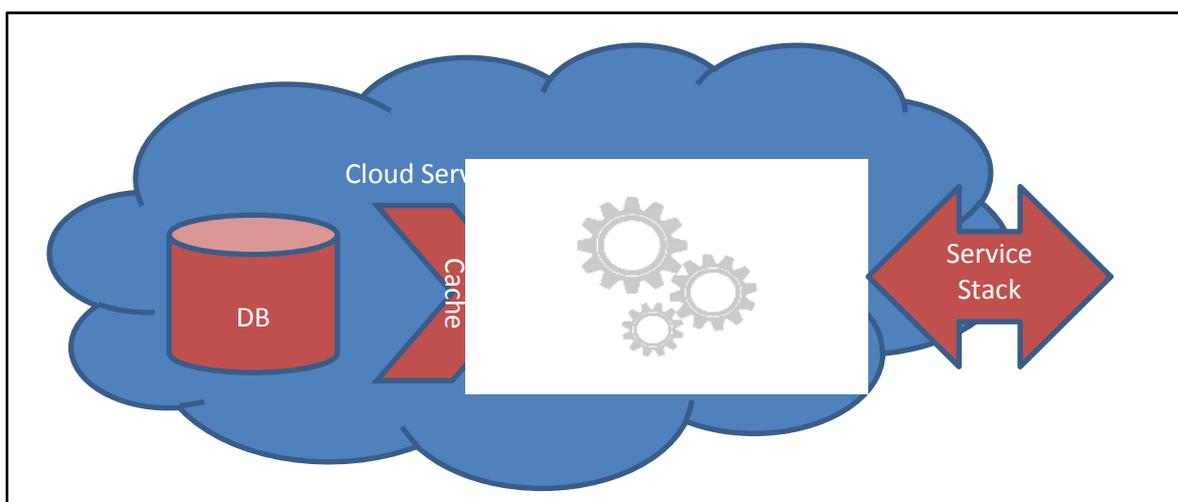


Abbildung 4: Logische Struktur der Server Anwendung.

Persistente Daten werden in der zentralen Datenbank gespeichert. Die interne Kommunikation der Server Anwendung mit der Datenbank wird über ein Cache System beschleunigt. Der Externe Zugriff

der Systemkomponenten (z.B. WebApp, BEVs) auf die Server Dienste wird über das Service Stack Framework realisiert.

2.2.2 WebApp

Zur Umsetzung des geplanten Mobilitätskonzeptes wurde eine Anwendung entwickelt, welche es erlaubt die Elektrofahrzeuge sowie die öffentlichen Verkehrsmittel zu buchen. Zudem können vorhandene Buchungen verwaltet, storniert sowie die Fahrt mit dem gewählten Verkehrsmittel angetreten und beendet werden. Um eine möglichst breite Masse an Benutzern zu erreichen wurde die Anwendung als WebApp realisiert. Diese ist im Browser eines beliebigen Smartphones, PC oder Tablets unabhängig vom Betriebssystem funktionsfähig. Realisiert wurde die App mit dem JavaScript Framework jQueryMobile sowie des Multiplattform Entwicklungstool „Apache Cordova“. Diese Kombination erwies sich als geeignet, da sie einerseits plattformübergreifend einheitlichen Zugriff auf unsere Dienste von Smartphones und PCs bietet und andererseits auf allen gängigen mobilen Betriebssystemen lauffähig ist und dort dem Verhalten einer nativen App gleicht. Zudem lässt sich die Darstellung mithilfe eines „Responsive Designs“ dynamisch an die Größe des Endgerätes anpassen. Der typische Verlauf einer Buchung wird in Abbildung 5 erläutert.

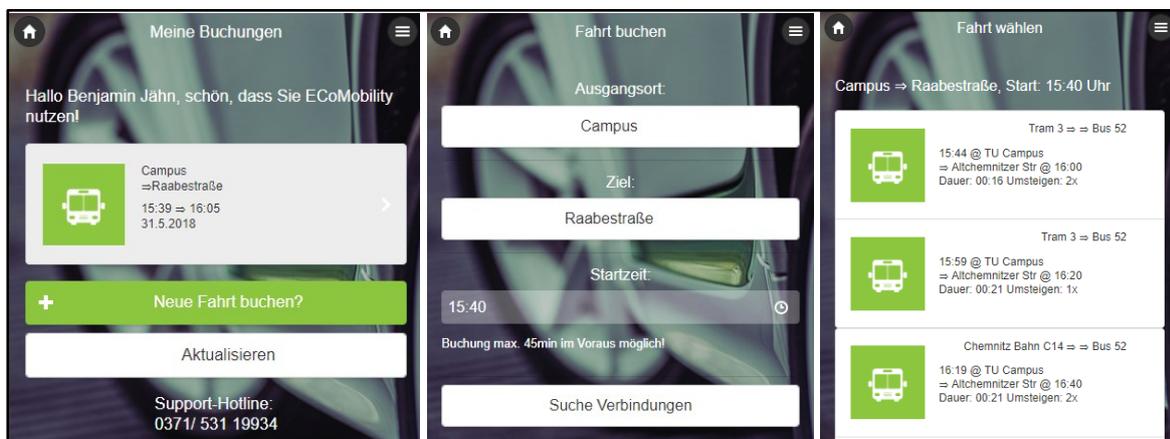


Abbildung 5: Verlauf einer Buchung über die ECoMobility WebApp.

Mit dem Button „Neue Fahrt buchen“ kann der Nutzer zunächst den Start- und Zielpunkt sowie die Abfahrtszeit auswählen. Anschließend wird eine Liste der möglichen Verbindungen mit den zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln angezeigt, welche nach Auswahl gebucht und damit reserviert werden können.

2.2.3 Ladesäulen Steuerungssoftware

Um Zugriff auf ladende und damit zusätzlich verriegelte BEVs zu erhalten, mussten die Nutzer auch mit den Ladesäulen über den eingebauten Touchscreen interagieren. Dazu wurde eine Steuerungssoftware entwickelt, welche die Steuerung der Hardware abstrahiert und über eine vereinfachte Schnittstelle an ein eingebettetes Browserfenster weiterleitete. Somit konnte die oben beschriebene WebApp zur Steuerung der Ladeelektronik und Verriegelung verwendet werden. Dem Nutzer konnte damit ein einheitliches und nahtloses Benutzerinterface zur Verfügung gestellt werden.

2.3 Methoden der Datenerhebung und Algorithmierung

2.3.1 Zugangssystem und Datenaufzeichnung BEVs

Der Zugang zu den BEVs sollte für jeden Nutzer so einfach wie möglich gehalten werden. Daher wurde der Zugang mithilfe der eindeutigen ID eines jeden Mitarbeiterausweises realisiert. Ein im Fahrzeug angebrachter RFID-Card Reader konnte die Karten-ID auslesen und mit einem bestimmten Nutzer verknüpfen. Um Zugang zu einem Fahrzeug zu erlangen, wurde die ID der Karte an das Serverbackend übermittelt und das Fahrzeug erhielt eine entsprechende Rückmeldung, ob die ID momentan Zugriffsrechte für das Fahrzeug besitzt. Traf dies zu, wurden die Türen und der Ladeport am Fahrzeug entriegelt sowie das Fahrzeug in einen fahrbereiten Zustand versetzt.

Eine weitere Aufgabe der Fahrzeugelektronik bestand in der Erfassung der Fahrparameter. Durch die Kombination von Mikrocontroller und Embedded Linux Plattform (s. Abbildung 6) konnte eine Vielzahl verschiedener Parameter gemessen und verarbeitet werden. Der Mikrocontroller arbeitet als Low Level System zur Aufnahme und Filterung von Systembusnachrichten. Des Weiteren werden alle Hardwareoperationen, also Türsteuerung und Zündung, durch diesen Controller bearbeitet. Das Embedded Linux System verwaltet höhere Aufgaben wie den Zugriff auf das UMTS-Netz und die USB-Geräte. Die Entscheidung für ein Linux System beruht auf mehreren Faktoren. Als Hauptfaktor ist die bessere Unterstützung von Kleinstrechnern. Durch die Verbreitung des RaspberryPi konnte auf einen großen Erfahrungsschatz seitens der Entwicklergemeinschaft zurückgegriffen werden.

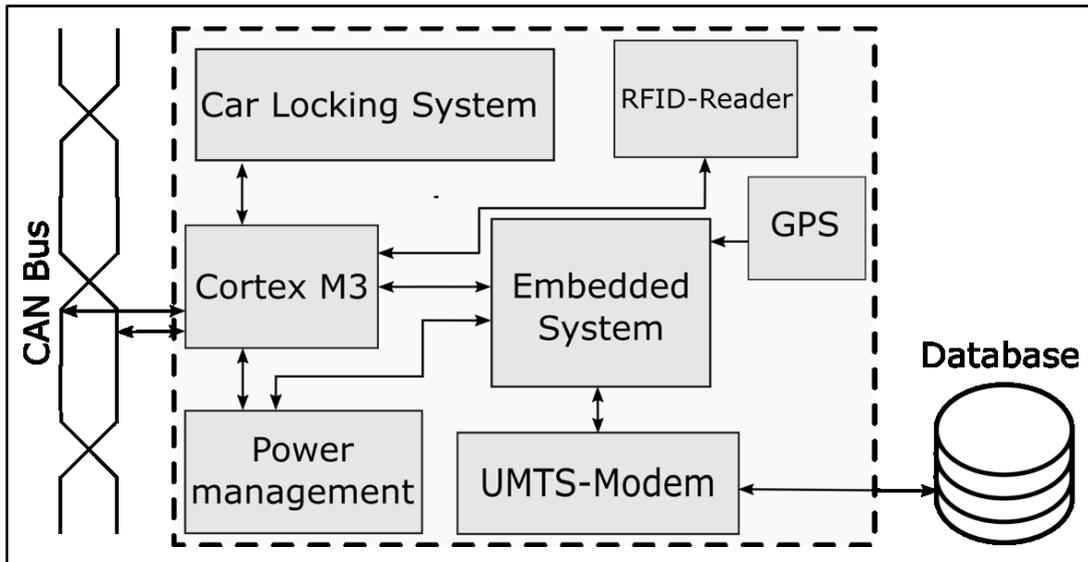


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Datenloggers und der Zugangskontrolle.

Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Server erfolgte wie schon erwähnt über den Service-Stack. Um eine sichere Kommunikation zu gewährleisten, wurde für jedes Fahrzeug täglich ein neuer Session Key vom Server generiert, mit welchem die gesendeten Daten signiert wurden. Diese Möglichkeit der Übertragungssicherung wurde ebenfalls für jede gebuchte Fahrt verwendet. Somit besaß jedes Fahrzeug einen täglich wechselnden Session Key sowie einen zusätzlichen Key für jede Fahrt. Durch dieses Vorgehen war ein Vermischen oder Fälschen der Daten nur noch sehr eingeschränkt möglich. Durch die zusätzliche Verschlüsselung über HTTPS und UMTS wurde sogleich ein Abgreifen der Daten unwahrscheinlich.

Als Programmiersprachen wurden C für den Mikrocontroller und C# für das Linux System verwendet. Um C# und das daraus resultierende Programm ausführen zu können, wurde auf das Mono Framework zurückgegriffen. Dieses ermöglichte die Ausführung von .NET Code auch auf Linuxsystemen.

2.3.2 Klassifikation des Fahrstils

Ziel der Klassifikation bestand in der Unterscheidung und Einordnung des Fahrstils der Nutzer in drei Gruppen. Dabei wurde anhand verschiedener Parameter (z.B. Beschleunigungsverhalten, spezifischer Energieverbrauch und Durchschnittsgeschwindigkeit) die Klassenzugehörigkeit des Nutzers bestimmt. Für die Klassifikation konnten unterschiedliche Methoden aus dem Bereich des maschinellen Lernens angewandt werden. Im Rahmen von ECoMobility wurde sich für künstliche neuronale Netze entschieden [6].

Für eine korrekte Klassifizierung der Nutzer musste das neuronale Netz mit einem Satz von bereits eingeordneten Daten angelernet werden. Dieses Lerndatenset wurde manuell aus den Fahrdaten gewählt und soll einen möglichst guten Querschnitt des Fahrverhaltens repräsentieren. Durch diesen Lernprozess wurde das neuronale Netz trainiert, um im laufenden Betrieb die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Klasse zu berechnen.

Für die konkrete Umsetzung wurde das Softwareframework Encoq 3.0 gewählt. Durch Encoq war es möglich, das neuronale Netz in C# / .NET direkt in das Backend zu integrieren. Das Netzwerk als solches besaß drei Schichten. Es besteht aus einer Eingabeschicht von 7 Neuronen, einer versteckten Schicht, welche aus 5 Neuronen besteht und einer Ausgabeschicht, die aus 3 Neuronen bestand. Diese drei Neuronen repräsentierten die drei Typen von Fahrstilen: Es resultierte eine Klasse für sehr sparsam fahrenden Nutzer, eine weitere für den durchschnittlich fahrenden Nutzer und eine Klasse für den sehr aggressiv fahrenden Nutzer mit hohem Energieverbrauch und damit niedrigerer Reichweite. Das neuronale Netz gab eine Zugehörigkeit der Nutzer in einem Bereich von -1.0 bis 1.0 für jede Klasse an.

2.3.3 Routing und Map Enhancement

Als letzter Teil des Forschungsbereichs E-Connected wurde ein energieeffizientes Routing sowie ein Algorithmus zum Anreichern von Open Street Map mit Energieverbrauchsdaten konzipiert [7]. Die Erstellung von Routen wurde durch Algorithmen zur Minimierung der Kosten entlang eines Weges erreicht (vgl. Abbildung 7). Diese Algorithmen werden als Pfadplanungsalgorithmen bezeichnet und stammen aus der Graphentheorie. Zu den bekanntesten Vertretern zählen der Dijkstra-Algorithmus sowie der A*-Algorithmus (A Stern).

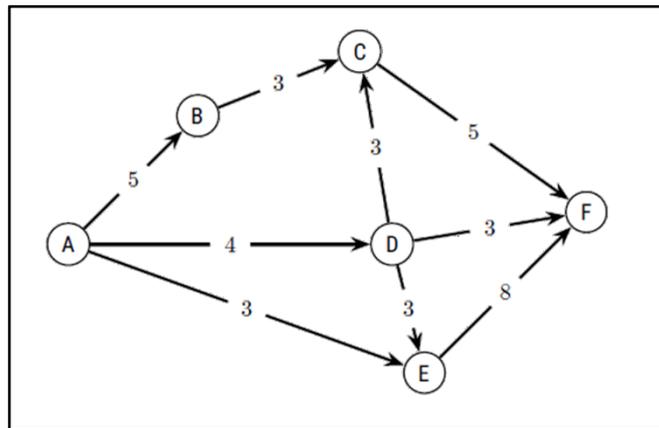


Abbildung 7: Exemplarischer Graph.

Ziel der Algorithmen ist es, einen Weg zu finden bei dem die Summe der Kantengewichte minimal ist. Die Kantengewichte können unterschiedliche physikalische Gegebenheiten repräsentieren. Für ein Routing im Straßenverkehr werden Parameter wie Zeit, durchschnittliche Geschwindigkeit oder Kosten/km genutzt. Um eine energieeffiziente Route zu generieren, mussten neue Kantengewichte eingeführt werden. Als neues Gewicht wurde der Energieverbrauch definiert und dem Router zur Optimierung übergeben.

Die hier verwendete Routing-Engine ist eine angepasste Version des GraphHopper Routers. Die von der Routing-Engine genutzten Gewichte sind in den Standardkarten der Open Street Map Datenbank nicht vorhanden. Um diese den Karten hinzuzufügen, wurde ein Modul entwickelt, welches die Messwerte aus der ECoMobility-Datenbank extrahiert und den Punkten in der OSM-Karte hinzufügt. Um die Messwerte der Fahrzeuge mit den Kartendaten in Einklang zu bringen, musste ein MapMatching durchgeführt werden. Der MapMatching Algorithmus arbeitet auf Basis von sogenannten Hidden Markov Modellen (HMM). Diese HMM stammen aus der Systemtheorie und modellieren nichtbeobachtbare Zustände eines Systems. Abbildung 8 veranschaulicht das MapMatching. Dabei ist die rote Linie eine Visualisierung der realen Messwerte aus einem Fahrzeug. Die Positionen sind durch Fehler in der Lokalisierung durch GPS nicht exakt auf der

eigentlich gefahrenen Straße. Der MapMatching Algorithmus analysiert diese Messwerte und ordnet diese den genauen Punkten der OSM Karte zu. Durch diese Zuordnung kann jeden Kartenpunkt auch eine Information zu der verbrauchten Energie hinzugefügt werden.

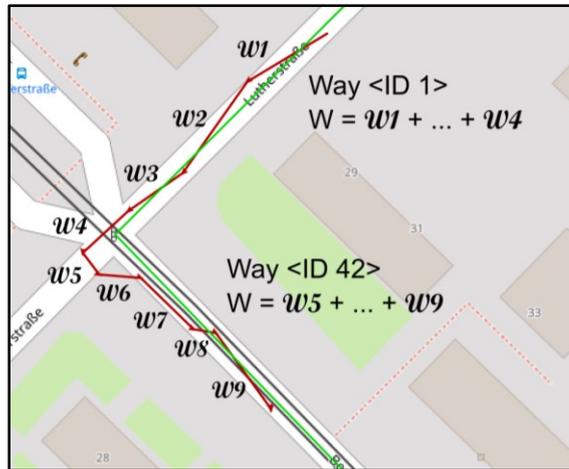


Abbildung 8: Prinzip MapMatching.

2.4 Ergebnisse

Während des Betriebs des ECoMobility-Systems ergaben sich durch neue Designentscheidungen und Probleme, immer wieder erweiterte Anforderungen. Einige Strukturentscheidungen, wie bspw. die systemweite Vereinheitlichung des Buchungssystems, erwiesen sich diesbezüglich als hilfreich, andere waren jedoch auch hinderlich (z.B. das Cachesystem). Die einzelnen Erkenntnisse werden im Folgenden dargestellt.

2.4.1 Serverarchitektur

Erwartungsgemäß sind im laufenden Betrieb des Systems mehrere GigaByte an Daten angefallen, welche in der Datenbank verarbeitet und gespeichert werden mussten. Ein Großteil dieser Daten wurde dort jedoch hauptsächlich zur späteren Auswertung archiviert. Die Vielzahl an Daten führte zu Performanceeinbußen in der Datenbank und das angeschlossene Cache System gewann daher immer mehr an Bedeutung und musste ausgebaut werden. Die Synchronisierung zwischen Datenbank und Cache gestaltete sich jedoch mit steigender Komplexität immer schwieriger und war daher häufig ein Grund für langwierige und aufwendige Fehlersuche.

Aus jetziger Sicht wäre eine Architektur mit zwei separaten Datenbanken, eine für den aktuellen Systemzustand und eine für archivierte Verlaufs- und Abrechnungsdaten sinnvoll. Die Datenbank für den Systemzustand könnte dahingehend für kleine Datenmengen und sehr schnell ausgelegt sein. Sie würde sich demzufolge eignen, die vielen parallelen Zugriffe, welche durch die Interaktion

der Nutzer mit dem System auftreten, zu handhaben. Die zweite Datenbank archiviert den Systemverlauf und speichert alle aufkommenden Ereignisse. Zugriff darauf benötigen lediglich zeitunkritische Auswertungen und Abrechnungsprozesse. Mit dieser Architektur könnte auf ein Cache-System verzichtet werden. Dies würde neben einer einfacheren und damit zuverlässigeren und agileren Entwicklung weitere Vorteile beim Betrieb bieten. Die Serveranwendung könnte damit zustandslos implementiert werden. Dies bedeutet, dass alle Prozesse und Anfragen lediglich die persistente Datenbank als Zwischenspeicher nutzen. Fallen zu bestimmten Tageszeiten keine Anfragen an das System an, wären demzufolge auch keinerlei Prozesse auf dem Server aktiv.

Ein solches System kann besonders einfach und günstig auf skalierbaren Cloudplattformen betrieben werden. Der Betrieb eines dedizierten Servers wäre damit nicht mehr notwendig. Dies wiederum birgt Vorteile durch einen geringeren Wartungsaufwand und geringere Kosten. Zudem sind solche Cloudplattformen besonders gut angebunden und in der Regel besser abgesichert als dedizierte Server. Abbildung 9 stellt diese Struktur grafisch dar. Darin enthalten sind eine schnellere aber kleinere System-Datenbank und eine größere aber dafür langsamere Datenbank für archivierte Daten. Auf ein Cache kann bei dieser Struktur verzichtet werden.

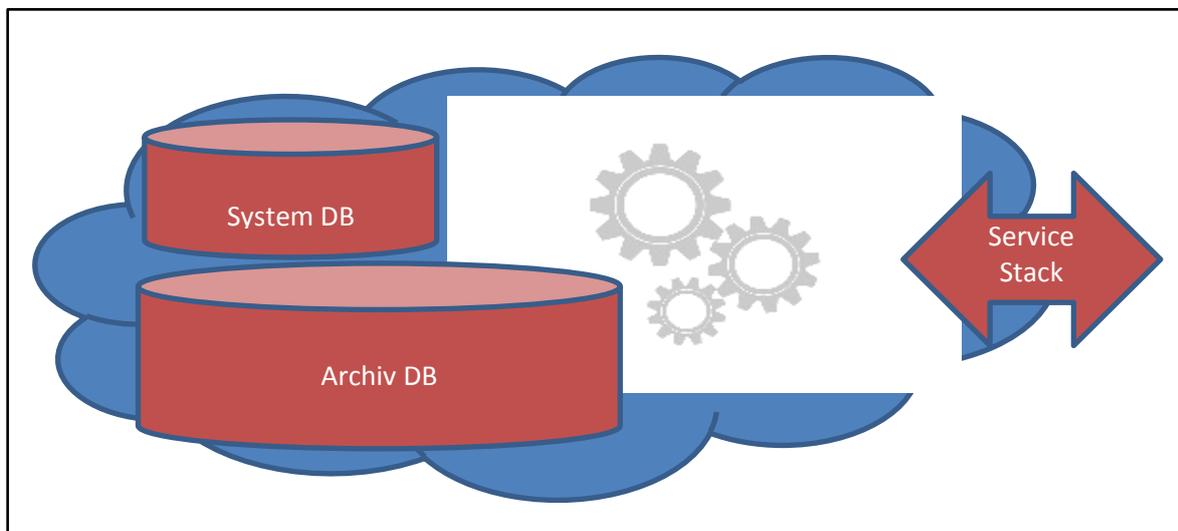


Abbildung 9: Optimierte Struktur der Cloud Server Anwendung.

Als weiterer Flaschenhals im Hinblick auf eine flexible Softwareentwicklung erwies sich das ServiceStack Framework. Es deckt lediglich die serverseitige Bereitstellung der Schnittstellen ab. Clients müssen mit davon unabhängigen Methoden passende Anfragen generieren und diese an den Server stellen. Moderne Remote Procedure Call (RPC) Frameworks wie Apache Thrift oder Google Protobuf + gRPC abstrahieren den kompletten RPC unabhängig von Plattform und

verwendeter Programmiersprache. Dies vereinfacht die Abstimmung von Client und Server Software signifikant, da beide Seiten mit demselben Framework abgebildet werden. ServiceStack wird zudem kommerziell vertrieben und kann nicht frei verwendet werden.

2.4.2 Betrieb, Erweiterung und Wartung der WebApp

Die Entscheidung, die Nutzerschnittstelle mithilfe von Web-Techniken umzusetzen, sorgte neben den oben genannten Vorteilen auch für einige Probleme. Die WebApp musste auf unterschiedlichen Browsern und Zielgeräten stets deckungsgleich arbeiten. Jedoch interpretierten unterschiedliche Browser manchen JavaScript Code unterschiedlich. Dies machte es erforderlich, die Anwendung auf einer Vielzahl von Geräten und Plattformen ausführlich zu testen. Moderne JavaScript Frameworks, wie das auch hier eingesetzte jQueryMobile, abstrahieren in dem Zusammenhang zwar bereits einiges, jedoch kam es trotzdem hin und wieder zu einigen nicht deterministischen und schwer reproduzierbaren Fehlern. In solchen Fällen war die Fehlersuche extrem langwierig und aufwendig. Häufig stellte sich heraus, dass die Ursache für solche Fehler in aufwendigen Animationen der Benutzeroberfläche lag. Um solche Probleme zu vermeiden, wurde die Anzahl und Komplexität der Animationen während des Projektverlaufs in der WebApp immer weiter reduziert. Dem Feedback der Nutzer zufolge war dieses schnörkellose und funktionale Design auch ansprechender, intuitiver und führte schneller zum gewünschten Ziel.

2.4.3 Gründe für Wartungsarbeiten

In dem umgesetzten System kommunizierten alle Komponenten lediglich mit dem Server und nicht untereinander. Dies hatte zur Folge, dass einige Systemparameter manuell von den Nutzern eingegeben werden mussten. Dies beinhaltete unter anderem die Frage, an welchem Ladeport ein Fahrzeug an die Ladesäule angeschlossen ist. Zudem mussten bei Wartungsarbeiten dem System immer wieder der reale Zustand übergeben werden. Dabei kam es häufig zu Fehleingaben, welche dazu führten, dass der virtuelle Systemzustand nicht mit dem realen Ist-Zustand synchron war. Dies wiederum begünstigte Fehlfunktionen, welche nicht nur die Nutzer frustrierten, sondern auch für signifikanten Wartungsaufwand sorgten. Könnte sich das Fahrzeug beispielsweise über das Ladekabel bei der Ladesäule authentifizieren, ließen sich solche Fehlerquellen automatisiert und zuverlässig umgehen. Dazu müssten allerdings die Komponenten untereinander besser vernetzt sein. Dies bietet zudem den Vorteil, dass sich der reale Zustand immer automatisiert auslesen lässt. Die Fehleranfälligkeit, der Wartungsaufwand und somit die Kosten würden in dem Fall drastisch sinken.

2.4.4 Zusammenspiel zwischen Ladesäulensteuerung und WebApp

Als besonders günstig erwies sich die Entscheidung, die Steuerung der Ladesäulenhardware über die WebApp umzusetzen. Dem Nutzer konnte damit nicht nur eine einheitliche Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden, sondern die Säulensteuerung konnte auch unkompliziert aus der Ferne mit der WebApp zusammen mit Updates versorgt werden, ohne dass ein Wartungsarbeiter an jeder Säule lokal ein Softwareupdate einspielen musste.

2.4.5 Fahrzeugzugang

Durch die Verwendung energieeffizienter Komponenten konnte die Standzeit, also die Zeit ohne Ladung, in der das BEV nur seine 12 Volt Batterie zur Verfügung hat auf über eine Woche gestreckt werden. Ebenso konnten durch den Datenlogger über 3 Mio. Datenpunkte aufgenommen werden. Durch die Nutzung des Mitarbeiterausweises konnte der Zugang zum Fahrzeug einfach gehalten werden und somit die Akzeptanz des Systems weiter gesteigert werden. Als problematisch hat sich die Verwendung von nicht-automotive-tauglichen Rechnern herausgestellt. Durch die wechselnden Temperaturbeanspruchungen im Winter sowie Hochsommer stieg der Wartungsaufwand stark an. Durch die „extremen“ Temperaturen wurde die Hardware in ihrer Funktionstüchtigkeit eingeschränkt und verursachte erhebliche Probleme mit dem Fahrzeugzugang.

2.4.6 Neuronales Netz

Das künstliche neuronale Netz konnte mit einer Erfolgsrate von 97,8 % angelernt werden. Durch die Klassifikation konnte jeder Nutzer mit einer gewissen Zugehörigkeit in eine von drei Klassen eingeordnet werden. Das heißt, dass ein Nutzer zu 80 % ein normaler Fahrer ist, aber auch 20 % sportlich fährt. Es wurde sich für die Einordnung in drei Klassen entschieden. Die Klassen repräsentieren dabei einen eher vorrausschauenden, einen durchschnittlichen und einen eher sportlichen Fahrstil. Nach Auswertung der Daten konnte festgestellt werden, dass die Nutzerdatensätze, die zum Anlernen des neuronalen Netzes genutzt wurden mit sehr hoher Präzision wieder ihrer Klasse zugeordnet wurden. Daraus lässt sich schließen, dass die verwendeten Fahrstilparameter als valide Indikatoren zur Nutzergruppierung identifiziert werden konnten¹.

¹ Ergebnisse sind Bestandteil der Veröffentlichung: Müller-Blumhagen, S., Günther, M. & J.F. Krems (2017). Driving Style Classification with Battery Electric Vehicles - Analysis of Driving Behavior and Intention. Paper presented at ETC, European Transport Conference, Barcelona, Spain. ISSN 2313-1853

Ein Vergleich mit gängigen DeepLearning Frameworks wie TensorFlow, Weka oder Matlab zeigt das Encoq 3.0 Netzwerk eine schlechtere Performance im Bereich der Konvergenzgeschwindigkeit während des Lernens sowie eine leicht höhere falschpositiv Rate in der Kontrollgruppe. Durch die Implementierung in C# entfiel dafür der Aufwand eines weiteren Frameworks auf dem Serversystem.

2.4.7 Routing und Map Enhancement

Das entwickelte Routingsystem basierte in weiten Teilen auf der Webanwendung GraphHopper. Diese frei zugängliche Software wurde an die Bedürfnisse für ein energieeffizientes Routing für Elektrofahrzeuge angepasst. Der Routingalgorithmus nutzte eine Karte, die auf dem Open Street Map Format basiert. Diese Karte beinhaltete alle Informationen, die auch im ursprünglichen OSM vorhanden sind, erweiterte diese aber mit den Verbrauchswerten der Fahrzeuge und Nutzergruppen für die Straßen. Um die Anwendung auch für Wege nutzen zu können, wo keine realen Messwerte vorliegen, wurden Standardwerte für unterschiedliche Straßentypen hinterlegt. Die Auswertung zeigte, dass der Routingalgorithmus unterschiedliche Routen für unterschiedliche Streckenoptionen generierte. Im Projekt wurde zusätzlich zu den Optionen schnellste und kürzeste Route noch eine effizienteste Route implementiert. In die Berechnung der energieeffizientesten Route wurden zusätzlich auch Distanz und Dauer als Einflussfaktor hinzugezogen². Durch diese Vermischung konnte eine deutliche sinnvollere Routenplanung erreicht werden. Würden alle Fahrten dem energieeffizienten Routing folgen, könnten bis zu 15.340 kg an CO₂ zusätzlich eingespart werden.

² Ergebnisse sind Bestandteil der Veröffentlichung: Müller-Blumhagen, S., Günther, M., & Krems, J.F. (2018). Using enriched OSM data for energy efficient routing. SOTM: State of the Map, Milan, Italy.

3 Forschungsbereich ECological

Im Kapitel ECological steht das ökologische Verhalten des Carsharing-Systems im Vordergrund. Dabei fokussieren sich die Arbeiten auf das Laden der Elektrofahrzeuge mit einem möglichst großen Anteil an erneuerbaren Energien. Neben einem klassischen Lademanagement zur Untersuchung der optimalen Ladezeiten wird in diesem Kontext zudem auch der Einsatz eines stationären Elektroenergiespeichersystems untersucht.

3.1 Zielstellung/Ausgangslage

Das Hauptziel von ECological ist die Ladeunterstützung der BEVs durch einen Energiespeicher. Betrachtet werden die Auswirkungen der vier Smart Fortwo-Fahrzeuge auf das Ladesystem. Bei allen vier BEVs beträgt die maximale Ladeleistung 11 kW. Um den Mobilitätsdienst nutzen zu können, muss ein BEV, das sich an der Ladestation befindet, mindestens 45 Minuten vor dem gewünschten Zeitpunkt gebucht werden. Das Ladesystem garantiert dabei, dass das BEV zum Zeitpunkt der Abholung immer einen bestimmten Ladezustand aufweist. Nach der Nutzung wird das BEV wieder an der Ladestation abgestellt. Die Ladestationen in diesem System sind gleichzeitig die Abhol- bzw. Abstellorte. Grid-to-Vehicle-Konzept (G2V-Konzept), d.h. die BEVs können die elektrische Energie nur aus dem Versorgungsnetz beziehen und diese nicht bei Bedarf wieder in das Netz zurückspeisen (z. B. bei schlechten Netzverhältnissen). Die Aufgabe der Ladestationen besteht nicht nur in der Lieferung der elektrischen Energie an die BEVs, sondern auch in der Sammlung der Daten über die Fahrprofile der BEVs und deren Sendung an einen zentralen Server.

Um das System effizienter und nachhaltiger zu gestalten, soll auch ein Energiespeicher integriert werden. Bei dem Energiespeicher handelt es sich um eine Li-Ionen-Batterie, auf deren Kapazitäts- und Leistungswert später noch eingegangen werden soll. Um alle erwähnten Bestandteile des Systems optimal ausnutzen zu können, ist eine Managementstrategie für die Koordination der Ladeprozesse erforderlich. Die Aufgabe dieser Strategie ist es, eine Entscheidung zu treffen, wann und wie viel Energie geladen bzw. entladen werden soll. Da die Ladeprozesse der BEVs an den Ladestationen nicht steuerbar sind, stellt die Ladesteuerung des Energiespeichers gleichzeitig die Managementstrategie für das ganze System dar. Ein vereinfachter Aufbau des Systems mit seinen entscheidenden Bestandteilen sowie den Informations- und Energieflüssen ist in der folgenden

Abbildung 10 dargestellt.

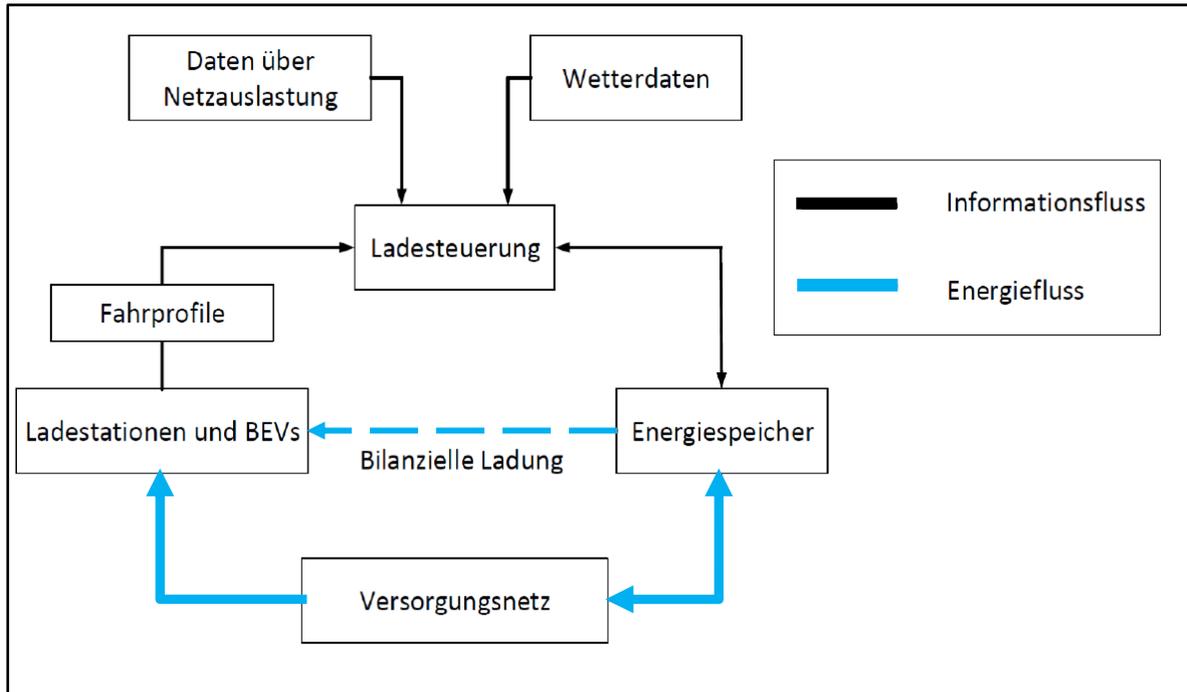


Abbildung 10: Übersicht Ladesystem.

In der Abbildung ist zu erkennen, dass keine direkte Verbindung zwischen dem Energiespeicher und den Ladestationen besteht, aber beide mit dem Versorgungsnetz verbunden sind. Der Ladevorgang der BEVs wird deswegen nicht direkt durch den Energiespeicher unterstützt, sondern bilanziell. Die bilanzielle Ladung funktioniert, indem der Energiespeicher immer dann entladen wird, wenn mindestens ein BEV elektrische Energie aus dem Versorgungsnetz bezieht und solange geladen wird. Da das Aufladen der Fahrzeuge und das Entladen der BEVs zum gleichen Zeitpunkt erfolgt, kann angenommen werden, dass der Energiespeicher dem Zweck der Ladeunterstützung dient.

3.2 Umsetzung

3.2.1 Eingangsdaten für die Ladesystemsimulationen

Für die Simulation der Ladeprozesse des Energiespeichers wurden vier Datenreihen benutzt. Die erste Datenreihe enthält Daten über die Netzlasten, die zweite über die Leistung der erneuerbaren Energien, die dritte über den unregelmäßigen Energiebedarf der BEVs und die letzte weist die Information aus, ob mindestens ein BEV zu einem bestimmten Zeitpunkt elektrische Energie aus dem Versorgungsnetz bezieht. Die Daten zum unregelmäßigen Energiebedarf der BEVs waren in 15-Minuten-Intervallen vorhanden. Diese wurden auf 5-Minuten-Intervalle interpoliert. Aus diesen interpolierten Daten wurde die vierte Datenreihe gebildet. Diese informiert darüber, in Form von 0 und 1, ob mindestens ein BEV zu einem bestimmten Zeitpunkt elektrische Energie aus dem Versorgungsnetz bezieht.

Die Simulation, wie sie im Folgenden behandelt wird, wurde über einen Zeitraum von 6 Monaten durchgeführt (von Januar bis Juli 2017). Es wird angenommen, dass der Zeitpunkt für einen Ladevorgang günstiger ist, je höher das Verhältnis von Leistung der regenerativen Erzeugungsanlagen zur aktuellen Verbrauchsleistung im Netz ist. Für die Berechnung der Leistung der regenerativen Erzeugungsanlagen wurden Daten zur Bestrahlungsstärke der Sonne und der Windgeschwindigkeit genutzt. Diese wurden an der TU-Chemnitz gemessen und waren als Rohdaten für den betrachteten Zeitraum verfügbar. Die Datenreihe mit der Leistung der Solarmodule (Ppv) wurde berechnet, indem die Ist-Werte der gemessenen Bestrahlungsstärke der Sonne mit dem Wert der standardisierten Testbedingungen dividiert (1.000 Watt/m^2) und danach mit der in Chemnitz installierten Leistung aus dem Jahr 2018 multipliziert wurden. Die Gesamtleistung der Solarmodule zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit beträgt $41.281,76 \text{ kW}$, wobei diese nur bei standardisierten Testbedingungen erreicht werden kann. Die Leistung der Windenergieanlagen wurde auf Basis der Windgeschwindigkeiten sowie der Leistungskennlinien der Windenergieanlagen berechnet. Der in Frage kommende Windpark befindet sich im Ortsteil Chemnitz-Rabenstein und hat insgesamt sieben Windenergieanlagen. Da insgesamt drei verschiedene Windenergieanlagen vorhanden sind, mussten die Leistungswerte für jede einzelne Anlage berechnet werden, weil diese verschiedene An-lauf-, Nenn- und Abschaltgeschwindigkeiten aufweisen. Bei der Ermittlung der Gesamtleistung aus erneuerbaren Energien wurde auch die Leistung der aus Biomasse gewonnener elektrischer Energie zugerechnet. Diese hat einen konstanten Wert von 1.814 kW ; dabei wurden jährliche Ausfallzeiten nicht berücksichtigt. Die Gesamtleistung der erneuerbaren Energien für den betrachteten Zeitraum wurde also als Summe der Datenreihen berechnet.

3.2.2 Modellierung der Speicherparameter

Im weiteren Verlauf soll die Auslegung der für die bilanzielle Betrachtung wesentlichen Speicherparameter Speicherlade- beziehungsweise Speicherentladeleistung und Speicherkapazität untersucht werden.

Für die Dimensionierung des Speichers wurde die Steuerung des Speichers aus dem vorherigen Kapitel verwendet. Zu den Eingangsdaten der Regelung gehören bereits die Leistungsdaten der Ladesäulen des ECoMobility Projektes. Ziel der Dimensionierung ist es, das Optimum zwischen Kapazität und Leistung eines Speichers zu finden, was eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien, die zur Ladung der Fahrzeuge genutzt werden, garantiert.

Durch Modifikation der Steuerung in Matlab® wurden die unterschiedlichen Möglichkeiten im Zusammenspiel zwischen Kapazität und Leistung des Speichers eingebettet. Die jeweils berechnete Ladeleistung des Speichers wurde durch Verknüpfung mit den Ladeleistungen der Ladestationen zur Berechnung des Anteils erneuerbarer Energien, die bilanziell zur Ladung der Fahrzeuge zur Verfügung steht, ausgewertet. Dies wurde jeweils für den gesamten Betrachtungszeitraum des ersten Halbjahres 2017 berechnet und zur Vergleichbarkeit der Mittelwert des Anteils erneuerbarer Energie gebildet. In Abbildung 11 sind die Ergebnisse zur Dimensionierung dargestellt. Hierbei ist der Zusammenhang zwischen Leistung, Kapazität und Anteil erneuerbarer Energien abgebildet. In Bezug auf die Speicherleistung ist der größte Anteil erneuerbarer Energien bei einem Maximum von ca. 9 kW.

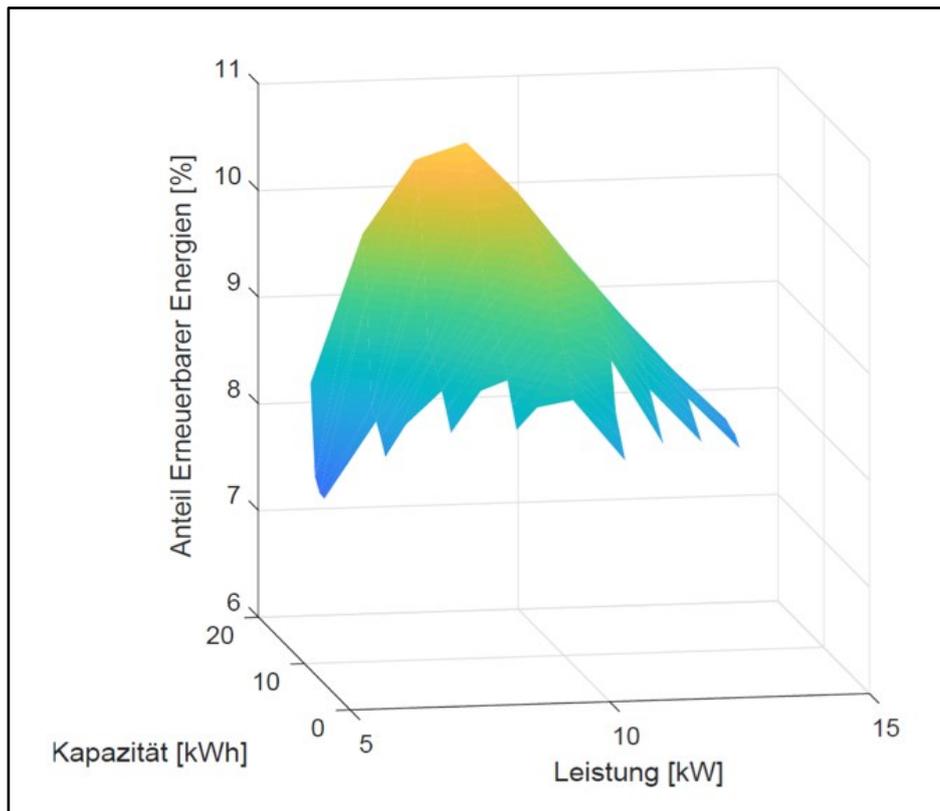


Abbildung 11: Auswirkung der Leistung und Kapazität eines Speichers auf den zur Aufladung der Elektrofahrzeuge genutzten Anteil erneuerbarer Energien.

Der Anteil erneuerbarer Energien steigt hingegen umgekehrt exponentiell mit der Kapazität des Speichers an. Das bedeutet, dass der Anteil erneuerbarer Energien bis circa 20 kWh relativ konstant ansteigt. Es ist ein Anstieg von ca. 7,5 % bis ca. 10 % zu verzeichnen. Ab der Kapazität von 20 kWh steigt der Anteil erneuerbarer Energien nur noch minimal. Allgemein könnte man die Kapazität des Speichers größer dimensionieren, jedoch ist aus wirtschaftlicher Sicht ein Optimum bei 15 kWh gegeben. Der Speicher wurde, aus diesem Kapitel abgeleitet, mit einer Kapazität von 15 kWh in die Simulation eingebunden. Die Leistung wurde aus der real installierten Speicherleistung von 10 kW festgelegt. Mit dem Optimum der Leistung bei 9 kW laut der vorherigen Dimensionierung sind nur geringe Verbesserungen bezüglich des Anteils an erneuerbaren Energien zu erwarten.

3.3 Eingesetzte Methoden

Im Rahmen der Energiespeicherauslegung wurden klassische Instrumente der Zeitreihenanalysen verwendet. Ergänzend hierzu basieren die Simulationen auf Netzberechnungen, hier sind damit Leistungsflussberechnungen gemeint. Dabei wurde auch auf Planungsgrundsätzen der elektrischen Energietechnik (z.B. technische Anschlussbedingungen, Merkmale der Spannungsqualität) zurückgegriffen. Bei Betrieb und Wartung der Ladesäuleninfrastruktur wurden Werkzeuge der Messtechnik sowie Regelungs- und Steuerungstechnik eingesetzt.

3.4 Ergebnisse

3.4.1 Entwicklung von Betriebsstrategien der stationären Energiespeichereinheiten

Um die Simulation durchführen zu können, werden zunächst im Folgenden unterschiedliche Ladeverfahren erstellt und getestet. Dabei werden zwei Basisladeverfahren zu Vergleichszwecken vorgestellt. Folgend werden Szenarien mit unterschiedlichen Verläufen für die Zielvorgaben „Nachhaltigkeit“ und „Speichernutzung“ behandelt.

Grundlegende Ladeverfahren als Vergleichsszenarien. Zum Überprüfen der absoluten und relativen Vorteilhaftigkeit der einzelnen Verfahren wird zunächst ein Basisverfahren betrachtet, bei dem die BEV vollständig und ohne Unterstützung eines externen Speichers aus dem Netz laden. Bei diesem Laden der BEV ohne Speichereinsatz geht der Anteil erneuerbarer Energien so in die BEV ein, wie er zur jeweiligen Zeit im Netz vorliegt und kann nicht durch gezieltes Eingreifen verbessert werden. Auch die Netzbelastung kann dabei nicht verringert werden, da ohne externen Energiespeicher die Fahrzeuge immer mit ihrer derzeitigen Ladeleistung das Stromnetz beanspruchen.

Der erste Ansatz mit Speicherunterstützung kann als einfache Erweiterung des eben dargestellten Falls (Ladung ohne Speicher) angesehen werden. Hier werden zunächst lediglich der externe Speicher selbst sowie die ladenden BEV betrachtet. Diese Möglichkeit kann als ein „Ungesteuertes Laden“ angesehen werden, bei dem die Zielvorgabe „erneuerbare Energien im Speicher maximieren“ zunächst nicht beachtet wird. Die Zielgröße „Netzentlastung“ wird hier nur indirekt berücksichtigt: Während beim Laden der Fahrzeuge der externe Speicher die Netzbelastung durch die Rückspeisung senkt, bleibt die Belastung beim Aufladen des Speichers bestehen. Der Speicher wird in diesem Szenario immer dann bei voller Leistung auf bis zu 95% seiner Kapazität geladen, wenn keines der BEV Leistung beansprucht.

Szenarien mit Schwerpunkt „Nachhaltigkeit“. Bei den folgenden drei Ladeverfahren der stationären Speichereinheit wird der Fokus auf eine nachhaltige Betriebsweise gelegt. Dies soll insbesondere dadurch erreicht werden, dass der Speicher möglichst schonend be- und entladen wird, das heißt die maximalen Leistungen nicht voll ausgenutzt werden, um eine zu starke Degradation des Speichers zu verhindern. Mit dieser schonenden Betriebsstrategie soll unter anderem eine längere Lebensdauer des Speichers ermöglicht werden. Außerdem wurde als weitere Zielsetzung festgelegt, dass die erneuerbaren Energien im Zuge der Nachhaltigkeit eine größere Gewichtung bei der Berechnung der Ladeleistung bekommen. Beim Schwerpunkt „Nachhaltigkeit“ werden drei Verfahren mit unterschiedlichen Verläufen der untergeordneten Ladeleistungen bearbeitet: Zunächst wird ein einfacher linearer Verlauf implementiert, gefolgt von einem quadratischen und zuletzt einem gestuften.

Szenarien mit Schwerpunkt „Speichernutzung“. Im Gegensatz zu den Nachhaltigkeitsszenarien wird in der Kategorie „Speichernutzung“ die volle Leistung bei Bedarf abgerufen. Eine mögliche frühzeitige Alterung der Speicherzellen wird dabei in Kauf genommen, da hierbei andererseits die Möglichkeit besteht, durch die höheren Ladeleistungen mehr Energie zu sinnvollen Zeitpunkten zu laden bzw. entladen. Zunächst sei der Verlauf wieder linear. Es ergibt sich das Szenario „Speicher nutzen mit linearem Verlauf“. Zudem werden für die Maßgabe der Speichernutzung erneut auch der quadratische und der gestufte Verlauf eingesetzt

Weitere mögliche Ladeverfahren. Die weiteren Verfahren stellen zwei unabhängige Wege dar und dienen dem Vergleich mit den anderen Ladestrategien. Beide Verfahren wurden bewusst als Kontrast zu den vorangegangenen aufgebaut. Ersteres zielt darauf ab, nur solche Werte der Variablen zu berücksichtigen, die bereits in sehr hohen (Anteil EE) oder sehr niedrigen Bereichen (Netzauslastung) liegen. Gewählt wurde sowohl für die EE als auch für die Netzauslastung die Schwelle von 50 %. Weiterhin Ladestrategie wurde ein Verfahren konzipiert, in welchem die Variablen, je nach Bereich, ausschließlich die maximale Leistung auslösen sollen. Die einzelnen Leistungen der Eingangsgrößen in der Strategie „Leistung maximieren“ verlaufen bis zum jeweiligen Mittelwert maximal positiv und ab diesem Punkt maximal negativ, bzw. umgekehrt. Lediglich der BEV-Einfluss verläuft wie bisher unverändert, da hier die maximale Leistung bei Entladung des Speichers bei gleichzeitig geringerer Ladeleistung der Fahrzeuge von vornherein ausgeschlossen wurde.

3.4.2 Vergleich der Ladeverfahren

Alle zehn Verfahren wurden durchgerechnet und in Bezug auf die vier wichtigen Parameter (Ladung durch erneuerbare Energien, Netzbelastung, Speichernutzung und Unterstützung der Ladung der Elektrofahrzeuge) auf ihre relative Vorteilhaftigkeit überprüft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Szenario 1: ohne Speicher		Szenario 6: Sp. nutzen/ Linear	
∅ EE	4,63	∅ EE	12,96
∅ Netzbelastung	69,64	∅ Netzbelastung	64,75
∅ SOC	Kein Wert	∅ SOC	51,49
∅ EV Ladung	Kein Wert	∅ EV Ladung	32,67
Szenario 2: Basis		Szenario 7: Sp. nutzen/ Quadratisch	
∅ EE	4,94	∅ EE	9,34
∅ Netzbelastung	69,74	∅ Netzbelastung	59,54
∅ SOC	74,21	∅ SOC	51,43
∅ EV Ladung	83,53	∅ EV Ladung	31,79
Szenario 3: Nachhaltig/ Linear		Szenario 8: Sp. nutzen/ Gestuft	
∅ EE	15,35	∅ EE	6,25
∅ Netzbelastung	70,90	∅ Netzbelastung	50,73
∅ SOC	57,18	∅ SOC	57,15
∅ EV Ladung	35,98	∅ EV Ladung	26,14
Szenario 4: Nachhaltig/Quadratisch		Szenario 9: Leistung maximieren	
∅ EE	13,23	∅ EE	8,31
∅ Netzbelastung	71,94	∅ Netzbelastung	62,19
∅ SOC	58,16	∅ SOC	50,51
∅ EV Ladung	35,71	∅ EV Ladung	39,66
Szenario 5: Nachhaltig/ Gestuft		Szenario 10: 50%EE & 50%Netz	
∅ EE	10,90	∅ EE	6,66
∅ Netzbelastung	67,89	∅ Netzbelastung	37,41
∅ SOC	64,15	∅ SOC	23,70
∅ EV Ladung	25,42	∅ EV Ladung	11,69

Tabelle 1: Vergleich der Szenarien in Bezug auf alle Parameter (in Prozent).

Für den abschließenden Vergleich aller Verfahren werden die Ergebnisse aus Tabelle 4.1 herangezogen. Da die einzelnen Werte der vier Kategorien (erneuerbare Energien (EE), Netzbelastung, Ladezustand (SOC), BEV-Ladung) teilweise sehr unterschiedlich stark auseinanderliegen, wurde zunächst die Spanne zwischen größten und kleinsten Wert berechnet. Während bei den EE der beste und der schlechteste Wert lediglich knapp zehn Prozentpunkte auseinanderliegen, beträgt die Spanne bei der EV-Unterstützung über siebenzig Prozentpunkte. Um in der Wertung diese Ausschläge zu glätten, wurde aus diesem „Spread“ ein Multiplikator errechnet, mit dem die Kategorien mit geringerem Ausschlag angepasst wurden. Dafür wurde jeweils die Spanne jeder Kategorie auf die Maximalspanne (dies ist bei der BEV-Ladung) bezogen. Innerhalb jeder separaten Kategorie wurde dann die Differenz zwischen jedem einzelnen Wert und dem Durchschnittswert der Kategorie gebildet. Zuletzt wurde für jeden Wert die Differenz zum Mittelwert der Kategorie berechnet und die einzelnen Werte, angefangen mit dem größten, absteigend sortiert. Lediglich bei der Netzlast stellt der niedrigste Wert das Optimum dar. Dieses wurde berücksichtigt.

Schlussendlich wurde eine Höherwertigkeit der Zielvorgaben „erneuerbare Energien im Speicher maximieren“ und „Netzbelastung senken“ festgelegt, da diese die eigentlich zu optimierenden Parameter darstellen, und diese Werte in der Berechnung doppelt gewertet. Es ergab sich nach der beschriebenen Berechnung folgende Endwertung bei der Vorteilhaftigkeit der Szenarien wobei die rechte Spalte eine Punktwertung darstellt:

Szenario	Vorteilhaftigkeit
3	34,53
6	26,17
4	14,11
5	-3,87
7	-4,25
8	-9,72
10	-13,64
2	-20,99
9	-22,34

Tabelle 2: Reihenfolge der Szenarien nach ihrer Vorteilhaftigkeit.

Die Szenarien 3, 6 und 4 sind nach dieser Berechnung am vorteilhaftesten, jedoch auch mit relativ deutlichen Abständen zueinander. Die Punktwertung selbst beschreibt lediglich das Verhältnis der Szenarien untereinander in Bezug auf Vorteilhaftigkeit; negative Werte sind in Relation zu den anderen zu sehen und werten die Verfahren nicht absolut.

Das Szenario 3, „Nachhaltigkeit - Linear“ gilt als das vorteilhafteste, weshalb dieses Verfahren zur Implementierung weiterverfolgt wird.

3.4.3 Simulation des Ladesystems mit angepasster Ladesteuerung

Im Folgenden werden zunächst noch weitere Vorüberlegungen erläutert, um die Simulation umsetzen zu können. Hierbei werden die Ergebnisse aus dem vorherigen Kapitel um einige Überlegungen erweitert. Zunächst wird erläutert, wie zwei verschiedene Methoden günstige Netzverhältnisse erkennen. Für die Simulation der Ladeprozesse werden insgesamt zwei Optimierungsmethoden für die Bestimmung von überdurchschnittlich günstigen Netzverhältnissen genutzt. Die Simulation wird mit jeweils einer Methode durchgeführt. Die erste Methode basiert auf der Partikelschwarmoptimierung (PSO), während die zweite als eigenständige Alternative zu PSO entwickelt wurde. Die zweite Methode wird daher im Verlauf der Arbeit als Alternative Methode (ALT) bezeichnet. Beide Methoden nutzen als Eingangsdaten die Leistung der erneuerbaren Energien und die Netzlasten und bei beiden Methoden kann der Ausgabewert „nicht laden“ oder „laden“ sein.

Zunächst wird die Funktionsweise der auf PSO basierten Methode erläutert werden. Das Ziel dieser ist es, einen optimalen Wert durch die anhaltende Bewegung der Partikel im Schwarm zu finden. Jeder dieser Partikel hat die Fähigkeit, seine momentane Position mit der vorherigen zu vergleichen, um sich zu entscheiden, ob er diese behält. So wird überprüft, ob der memorierte Wert besser als der neue Wert ist. Ist dies der Fall wird der neue Wert abgeworfen und der alte beibehalten. In der vorliegenden Arbeit wird mit dieser Methode der günstigste Zeitpunkt eines Tages bestimmt (lokale Maximalwerte), um den Batteriespeicher zusätzlich mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien zu laden. Der Vorteil dieser Optimierung besteht darin, dass sich diese schon ab dem ersten Tag selbst anpasst und keine Berechnung im Vorfeld vorgenommen werden muss. Im Gegensatz zur ALT-Methode, die das Ladesignal in 5-Minuten-Intervallen ermittelt, erfolgt diese Ermittlung bei der PSO-Methode in 1-Stunden-Intervallen. Der Grund dafür ist, dass sich bei solcher eine ähnliche Gesamtladezeit für den betrachteten Zeitraum wie bei der ALT-Methode ergab. Zunächst werden die Werte von der Leistung der erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen bezogen auf die aktuelle Netzleistung in 5-Minuten-Intervallen berechnet und nach jeder Stunde wird eine

Prognose mit der PSO-Methode aufgestellt. Im Weiteren werden im ersten Schritt die 5-Minuten-Prognose-Intervalle für die folgende Stunde ermittelt, indem wiederum das Verhältnis von der Leistung der erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen bezogen auf die aktuelle Netzleistung gebildet wird. Dies geschieht diesmal für den gesamten Zeitraum. Im zweiten Schritt wird der arithmetische Mittelwert für drei Zeitperioden berechnet. Das erste AM {1} ergibt sich aus den gemessenen

5-Minuten-Intervallen der letzten Stunde. Das zweite AM {2} wird für die erste Hälfte der folgenden Stunde und das dritte {3} für die zweite Hälfte aus den ermittelten 5-Minuten-Prognose-Intervallen berechnet. Im Fall, dass {1} größer als {2} und {3} ist, wird {1} mit dem Wert des globalen Maximums verglichen. Falls {1} größer als der Ist-Wert des globalen Maximums ist, wird {1} das neue globale Maximum. Ab diesem Zeitpunkt wird der Energiespeicher, falls möglich (immer, wenn SOC < 100 %), eine Stunde lang geladen. Wenn {1} kleiner als {2}, {3} oder das globale Maximum ist, wird angenommen, dass die Netzverhältnisse in der nächsten Stunde günstiger sein werden und es findet kein Ladeprozess statt. Die Ladesignale werden nach jedem Schleifendurchlauf gezählt. Falls nach sechs Stunden kein einziges Ladesignal aufgetreten ist, wird das globale Maximum um 5 % verringert. So wird vermieden, dass z. B. ein globales Maximum aus dem Frühling oder Sommer die Ladung des Energiespeichers im Winter verhindert. Es wurde auch einberechnet, dass fehlerhafte Daten auftreten können, daher wird bei einem möglichen globalen Maximum immer überprüft, ob dieses dreimal oder um ein weiteres Vielfaches größer ist als der Ist-Wert des globalen Maximums. Wenn dieser größer ist, wird der Ist-Wert beibehalten.

Die Alternative-Methode hingegen besitzt dem im Folgenden aufgezeigten Aufbau. Zunächst werden im ersten Schritt das Verhältnis der Leistung der erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen bezogen auf die aktuelle Netzleistung für die folgenden 5 Minuten berechnet. Dieser Wert wird anschließend mit dem dafür abgespeicherten Maximum verglichen, um zu ermitteln, ob es sich bei diesem Ist-Wert um ein Tagesmaximum handelt. Das Maximum beträgt im ersten Schritt 0, übernimmt nach diesem Schritt den Wert des ersten Berechnungsergebnisses und wird daraufhin während des Tages immer wieder neu ermittelt. Nachdem das Tagesmaximum ermittelt wurde, wird dieses zu der Summe der Maximalwerte addiert. Die Summe der Maximalwerte ergibt eine neue Variable. Diese Variable wird jeden Tag einmal berechnet. Nach der Berechnung dieser Summe wird der Wert des Tagesmaximums für den kommenden Tag auf 0 gesetzt. Dieser Prozess wiederholt sich für sieben Tage. Nach dem Ende des siebten Tages wird wieder eine neue Variable eingeführt. Bei dieser handelt es sich um den arithmetischen Mittelwert der Tagesmaximalwerte einer Woche. Nach der Berechnung wird die Summe der Maximalwerte für die kommende Woche

auf 0 gesetzt. Der berechnete Wert von AMW wird als Referenzwert für die kommende Woche herangezogen und dient als Entscheidungshilfe dafür, ob der Energiespeicher zusätzlich geladen werden soll. Diese Entscheidung wird getroffen, indem die in der Realzeit gemessenen Werte des Verhältnisses der Leistung der erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen bezogen auf die aktuelle Netzleistung mit dem arithmetischen Wochenmittel verglichen werden. Falls der Ist-Wert größer oder gleich im Vergleich zum arithmetischen Wochenmittelwert ist, kann in diesem 5-Minuten-Intervall eine zusätzliche Ladung erfolgen, bei der das Ladesignal auf 1 gesetzt wird. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass eine dynamische Anpassung des AMW auf wöchentlicher Basis erfolgt. So wird verhindert, dass der Energiespeicher im Winter nicht ein einziges Mal geladen wird, weil die Werte der Leistung der erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen deutlich niedriger sind als in den Frühlingsmonaten. Der Nachteil dieser Methode liegt darin, dass der Wert des ersten AMW erst nach sieben Tagen bekannt ist. Um diesem Nachteil entgegenzuwirken, bieten sich zwei Lösungsmöglichkeiten an. Die erste besteht darin, das AMW in der ersten Woche auf einen hohen Wert zu setzen, damit sämtliche Ladesignale in der ersten Woche den Wert 0 übernehmen. Als zweite und bessere Lösung wird das AMW der vorherigen Woche berechnet und dieser Wert als Start-Wert gesetzt. Bei der Simulation wurde die zweite Lösung angewandt, und der arithmetische Wochenmittelwert für die erste Woche aus 2017 berechnet.

3.4.4 Darstellung und Bewertung der Ergebnisse

Die Ladeprozesse des Energiespeichers wurden zunächst ohne die Anwendung der PSO- oder ALT-Methode mit der Ladesteuerung simuliert und anschließend mit jeweils einer der beiden. Anhand der Simulationsergebnisse werden die Vor- und Nachteile der Steuerung mit diesen Methoden verglichen, um festzustellen, ob deren Einsatz geeignet ist.

Zunächst wird der durchschnittliche Anteil der erneuerbar erzeugten Energie im Energiespeicher der Fahrzeuge während jedes Monats in Abbildung 12 dargestellt. Es ist sichtbar, dass ein Einsatz der PSO- oder ALT-Methode diesen deutlich erhöhen kann. Trotz dieser zusätzlichen Lademöglichkeit von 32 Stunden und 50 Minuten war die Abweichung der PSO- von der Alternativen-Methode bis Mai gleich oder kleiner als ein Prozentpunkt. Im Mai und Juni waren die Ergebnisse bei der alternativen -Methode deutlich besser. In allen drei Simulationsfällen konnte der Energiespeicher nicht zu jedem Zeitpunkt innerhalb der sechs Monate ausreichend Energie für die Ladeunterstützung der BEVs bereitstellen. Diese Fälle traten jedoch selten auf und zu Zeitpunkten, bei denen der Energiebedarf der BEVs hoch und die Anzahl der zusätzlichen Ladesignale für besonders günstige Ladezeitpunkte niedrig war.

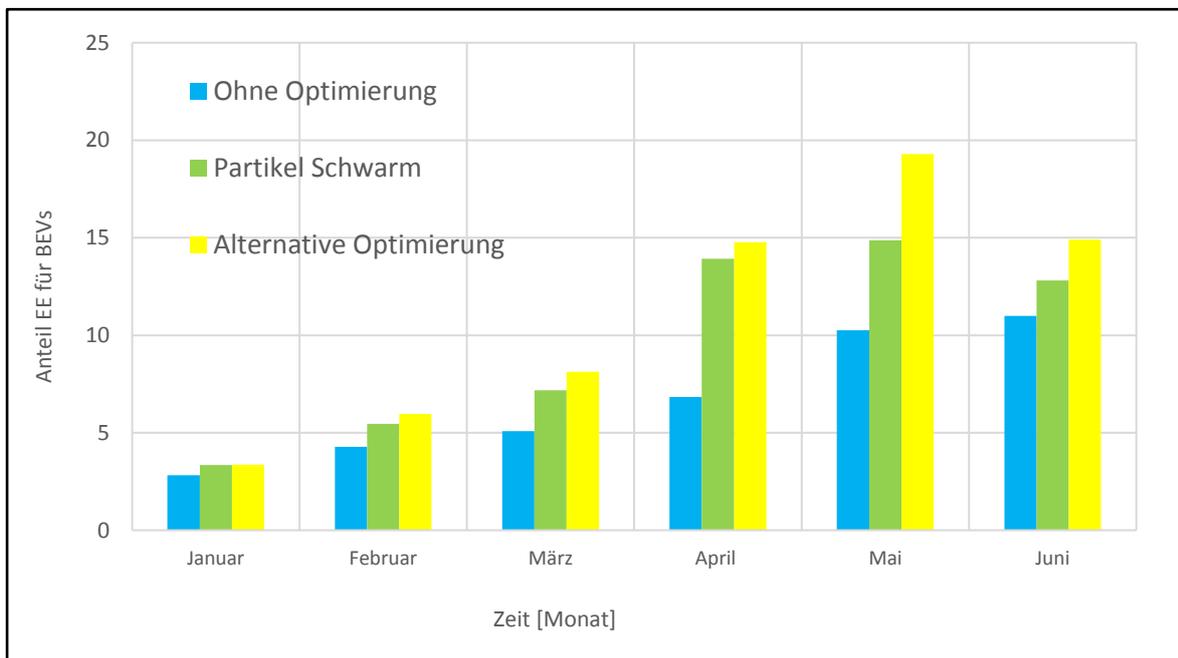


Abbildung 12: Anteil der erneuerbar erzeugten Energie an der Ladeenergie der Fahrzeuge.

3.4.5 Überprüfung des Einsatzes stationärer Speicher

Wird das System umgestellt und lässt die Optimierung der Ladezeitpunkte der Elektrofahrzeuge angreifen, stellt sich der Umstand aus Abbildung 13 dar. Hierbei wird der günstige Ladezeitpunkt zunächst von einem oder mehreren BEVs genutzt, bevor es dem Speicher ermöglicht wird, Energie einzulagern.

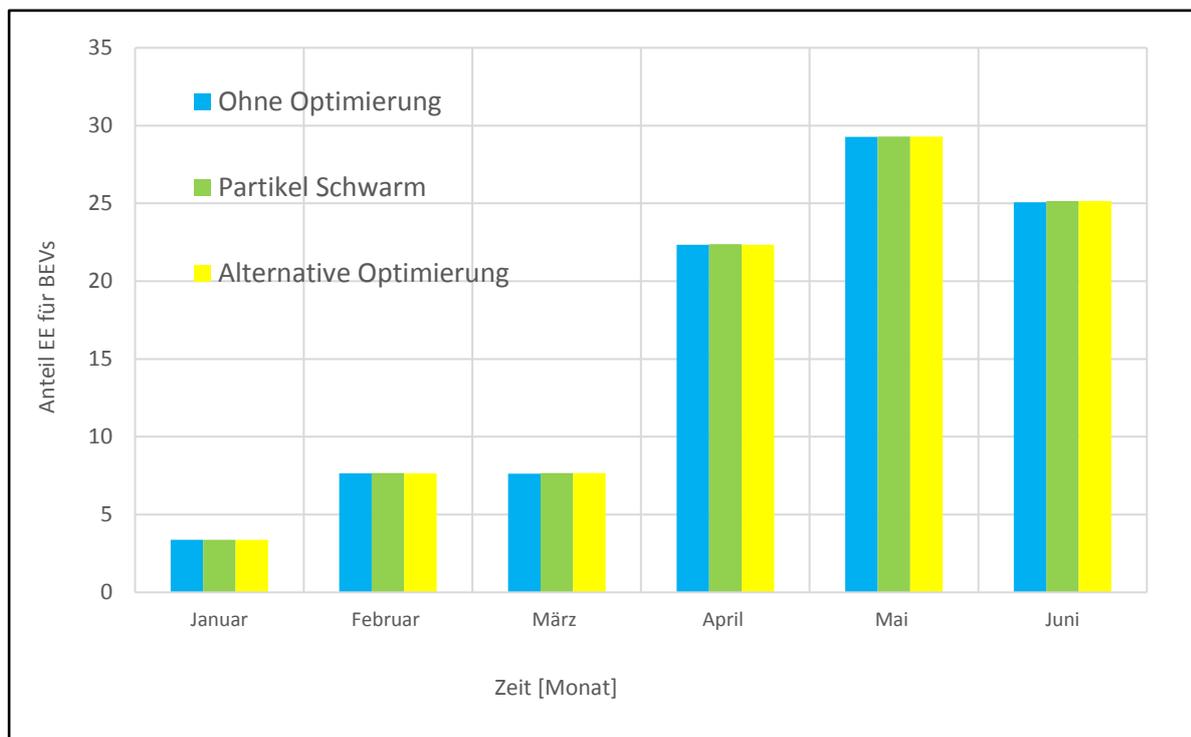


Abbildung 13: Anteil der erneuerbar erzeugten Energie an der Ladeenergie der Fahrzeuge, bei direkter Optimierung der Ladezeitpunkte der Fahrzeuge.

Die BEVs können über die Optimierung ebenso die Ladezeitpunkte so vorgegeben bekommen, dass ein nahezu identischer Anteil an Energie aus erneuerbaren Energieerzeugungsquellen geladen wird, ohne, dass sie einen Speicher benötigen. Dies Ergebnis beruht maßgeblich auf den hohen Standzeiten der Fahrzeuge und ist bei einer häufigeren Nutzung der Fahrzeuge erneut zu bewerten. Die verschiedenen Varianten der Optimierungen verändern das Ergebnis nur minimal, da der Speicher nicht laden soll, wenn die Fahrzeuge bereits laden und die verbleibenden Ladezeitpunkte weniger günstig sind. Somit ist ein Einsatz von stationären Energiespeichern im gegebenen Kontext des vorhandenen Carsharing-Systems als technisch nicht sinnvoll an zu sehen.

4 Forschungsbereich ECo-type adaptive

Zunächst werden im Kapitel 4 die Zielstellungen des Forschungsbereichs ECo-type adaptive und zu Beginn formulierte Forschungsfragen dargestellt. Weiterhin wird im Rahmen der Umsetzung auf die Studienkonzeption und Teilnehmerrekrutierung eingegangen. Die eingesetzten Methoden und erzielten Ergebnisse werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

4.1 Zielstellung/Ausgangslage

Der Forschungsbereich ECo-type adaptive beschäftigte sich mit dem Nutzerverhalten und den Nutzerbewertungen in Interaktion mit dem ECoMobility-System. Dabei wurden die Nutzungshäufigkeiten in Abhängigkeit der Erfahrung mit dem System und der unterschiedlichen Verkehrsmittel und deren Akzeptanz analysiert. Darüber hinaus stand die Beeinflussung des Nutzerverhaltens, genauer der Verkehrsmittelwahl und des energieeffizienten Fahrverhaltens mit dem BEVs, durch verschiedene Anreizsysteme im Vordergrund. Der dritte Forschungsgegenstand galt der Evaluation des entwickelten Routingalgorithmus und dessen Erprobung unter Realbedingungen.

Daraus resultierende Forschungsfragestellungen lauteten:

- Wie häufig wird das ECoMobility-System von den Probanden auf ihren dienstbezogenen Wegen genutzt?
- Wie bewerten die Probanden das ECoMobility-System?
- Gibt es hinsichtlich der Akzeptanz des ECoMobility-System Unterschiede zwischen Nicht-Nutzern und Nutzern?
- Verändert sich die Bewertung des ECoMobility-Systems in Abhängigkeit der Nutzungszeit?
- Wie lassen sich eine nachhaltige Verkehrsmittelwahl und ein energieeffizientes Fahrverhalten mit den BEVs motivieren?
- Wie wird das entwickelte Routingdisplay für BEVs im Vergleich zu einem konventionellen Routingdisplay bewertet?
- Welche Zusatzanforderungen werden von den Probanden an ein Routingdisplay für BEVs gestellt?

4.2 Umsetzung

Für die Beantwortung der zahlreichen Forschungsfragen wurde eine knapp zweijährige Feldstudie konzipiert. Für diese wurde ein wissenschaftliches Forschungsdesign erstellt, Methoden entwickelt und ausgewählt sowie Probanden rekrutiert.

4.2.1 Probandenrekrutierung

Für die Durchführung der Nutzerstudie wurde zunächst ein Onlinefragebogen (Screener) zur Registrierung potentieller Interessenten erstellt. Dieser wurde über diverse Medien (z.B.: TU Chemnitz Mailverteiler, Newsletter, Pressemitteilungen, Uni-aktuell-Meldungen) annonciert. An die Teilnahme an den Nutzerstudien und der damit verbundenen ECoMobility-System-Nutzung waren verschiedene Voraussetzungen geknüpft: Probanden mussten für die Nutzung der Fahrzeuge in die Datenerhebung (via Fragebögen und Datenlogger) einwilligen und aufgrund von versicherungsrechtlichen Aspekten über ein aktives Beschäftigungsverhältnis mit der TU Chemnitz verfügen (z.B. Ausschluss von Elternzeit, Beurlaubung und Mutterschutz). Insgesamt registrierten sich 359 Interessenten, von denen 207 Probanden ausgewählt wurden. Von den Probanden waren 146 männlich (29% Frauen) und im Mittel 32 Jahre ($SD = 7.8$, $Min = 18$ Jahre, $Max = 64$ Jahre) alt. Die Probanden verteilten sich über alle Beschäftigungsgruppen und Universitätsstandorte an der TU Chemnitz. Abbildung 14 enthält die jeweiligen Anteile und Häufigkeiten.

Der Studienbeginn erfolgte am 1. August 2016 und die Einstellung der Datenerhebung am 20. Juli 2018. Im Rahmen der fast zweijährigen Datenerhebung konnten neue Probanden kontinuierlich im Projekt einsteigen und durchliefen stets den identischen Datenerhebungsprozess (s. Abschnitt 4.2.2). Aufgrund der fortlaufenden Teilnehmerrekrutierung und dem jederzeit möglichen Ausstieg von Probanden variierten die Stichprobengrößen zwischen den verschiedenen Erhebungszeitpunkten. Die für die Analysen jeweils zugrundeliegenden Stichprobengrößen werden im Folgenden stets angegeben.

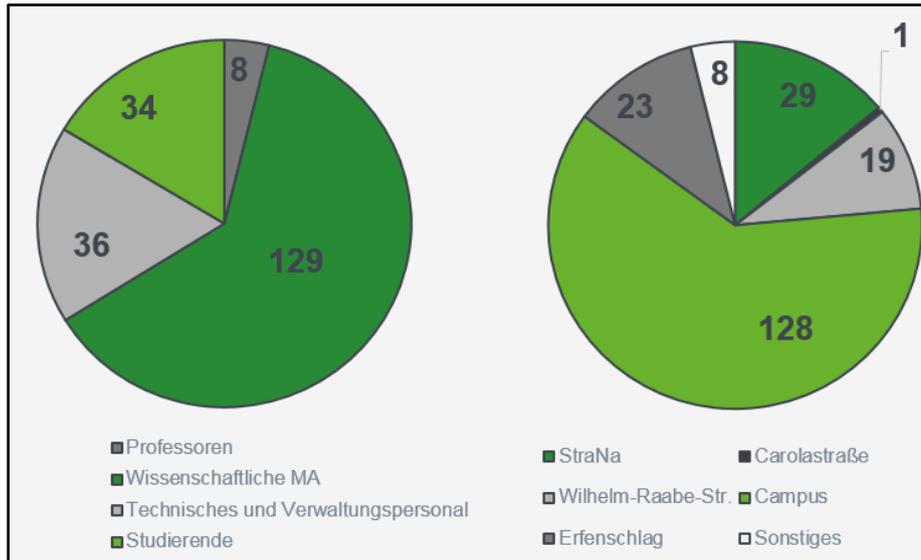


Abbildung 14: Anteil und Häufigkeiten der im Projekt teilnehmenden Probanden hinsichtlich deren Beschäftigungsgruppe und -ort.

Anmerkung: Wissenschaftliche MA = Wissenschaftliche Mitarbeiter, StraNa = Universitätsteil in der Straße der Nationen, Campus = Universitätsteil in der Reichenhainer Straße.

4.2.2 Studiendesign

Die Nutzerstudie wurde als Längsschnittstudie mit mehreren Erhebungszeitpunkten konzipiert. Dazu wurden von den Studienteilnehmern in regelmäßigen Abständen Online-Fragebögen ausgefüllt, in denen sie zu ihrem Mobilitäts- und Nutzungsverhalten befragt wurden. Der erste Nutzerkontakt fand im Rahmen des Sreeners statt, mittels dem die Teilnehmerselektion erfolgte. Eine Woche vor dem ersten Fahrzeugzugriff wurde eine umfangreiche Einweisung in die technischen Systemkomponenten und deren Handhabung sowie eine rechtliche Belehrung zum sachgemäßen Umgang und versicherungsrechtlichen Bedingungen durchgeführt. Daran war die erste Onlinebefragung (T0-1) gebunden. Nach den ersten 14 Tagen des Nutzerzugangs erfolgte die zweite Befragung (T0). Alle weiteren Befragungen fanden im Abstand von zwei Monaten statt (vgl. Abbildung 15).

4.3 Eingesetzte Methoden

Die in ECo-type adaptive eingesetzten Methoden beinhalteten eine Kombination aus verschiedenen Onlinefragebögen zur Erfassung des Nutzererlebens und -Verhaltens. Ferner wurden verhaltensbasierte Daten, wie das Fahrverhalten und die Interaktion mit dem Buchungssystem herangezogen. Die Sammlung der verhaltensbasierten Daten erfolgte eventbasiert, hingegen wurden die Nutzerbefragungen kontinuierlich nach einem festgelegten Turnus erhoben. Abbildung 15 gibt einen Überblick über alle im Projekt ECoMobility erhobenen Datenquellen.

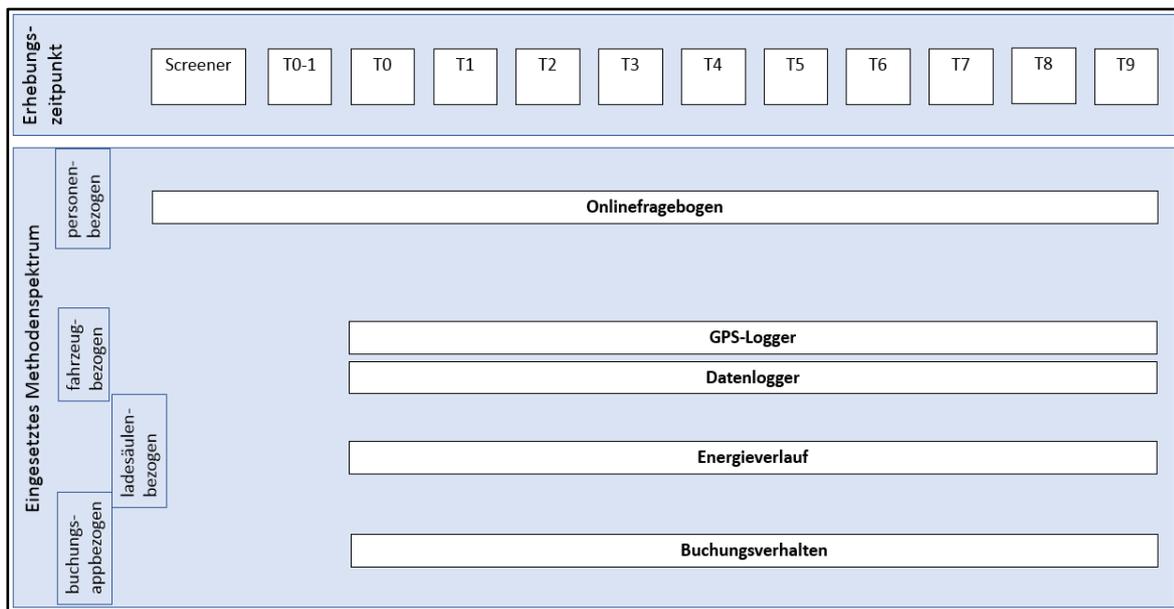


Abbildung 15: Erhebungszeitpunkte und eingesetzte Methoden der Nutzerstudie.

Anmerkung: GPS = Global Positioning System.

4.4 Ergebnisse

Bevor mit der Datenanalyse begonnen werden konnte, war ein umfangreicher Aufbereitungsprozess notwendig (Abschnitt 4.4.1). Nachfolgend werden die Ergebnisse zu den Themenfeldern Mobilität- und Nutzungsverhalten (Abschnitt 4.4.2), Nutzerbewertung (Abschnitt 4.4.3) sowie Anreizgestaltung (Abschnitt 4.4.4) berichtet. Abschließend werden die Ergebnisse zur Routingstudie (Abschnitt 4.4.5) vorgestellt.

4.4.1 Prozess der Datenaufbereitung

Nach jedem Erhebungszeitpunkt wurden die gewonnenen Nutzerangaben in geeignete Statistik- und Datenverarbeitungssoftware überführt und für die Analyse aufbereitet.

Onlinefragebogenangaben. Für die erhobenen Onlinefragebogendaten wurden diverse Korrektur- und Plausibilisierungsvorgänge vorgenommen, um z.B. missverstandene Frageformulierungen zu identifizieren und zu bereinigen. Mit Abschluss der Datenerhebung wurden alle erhebungszeitpunktspezifischen Datensätze in einen Gesamtdatensatz überführt. Nachfolgend wurde begonnen Workflows (insbesondere Syntaxen für die Statistiksoftware) zu konzipieren, mit denen für bestimmte komplexere Skalen die Scores erzeugt werden konnten.

Zusammenführung Fragebogenangaben und verhaltensbasierte Daten. Besonders anspruchsvoll war der Abgleich von Fragebogen- und verhaltensbasierten Daten. Die verhaltensbasierten Datensätze (Fahrverhalten, Buchungsverhalten) wurden aus der Datenbank zur weiteren Aggregation und Verknüpfung selektiert. Zunächst wurde durch den Einsatz der Fragebogenkürzel eine Verknüpfung mit den jeweiligen Buchungs- und Fahrdaten hergestellt. Verhaltensbasierte Daten ohne entsprechenden Fragebogenschlüssel (z.B. von Projektmitarbeitern und Hilfskräften) wurden aus der weiteren Datenaufbereitung ausgeschlossen. Es wurden zahlreiche Vergleichsauswertungen durchgeführt, um die Konvergenz der Ergebnisse gleichartiger Analysen auf Basis unterschiedlicher Datenquellen zu überprüfen. Durch die Erstellung von Datenalgorithmen und verschiedenen Plausibilisierungsschleifen konnte die Zusammenführung der Fragebogenangaben und verhaltensbasierten Daten trotz dieser Unschärfen auf einem hohen Auflösungslevel realisiert werden.

Qualitative Interviewfragen. Die aufgenommenen Nutzerantworten zu den qualitativen Interviewfragen wurden zunächst verschriftlicht (transkribiert) und für jede Frage wurde ein Kategoriensystem erstellt. Die Nutzerantworten wurden mittels dieses Kategoriensystems den

generierten Antwortgruppen zugewiesen und klassifiziert. Die Aussagen der Probanden wurden nach der induktiven Vorgehensweise nach Mayring [8] von zwei unabhängigen Ratern kodiert.

Qualitätssicherung. Durch die skriptbasierte Durchführung aller Aggregationen und Datensatzzusammenführungen sowie die gezielte Korrektur und Plausibilisierung aller Nutzerangaben kann die Qualitätssicherung als gegeben betrachtet werden. Ziel der Datenaufbereitung bestand in der Bereitstellung der erhobenen Daten in einer Form, die wissenschaftlich fundierte Auswertungen zur Beantwortung der Forschungsfragen erlaubt.

4.4.2 Mobilitäts- und Nutzungsverhalten

Mit den drei unterschiedlichen Verkehrsmitteln BEV, Pedelec und ÖPNV wurden im Untersuchungszeitraum August 2016 bis Juli 2018 insgesamt 2017 Fahrten von 117 Nutzern zurückgelegt. Auf die BEVs entfallen 1461 Fahrten (73%), auf die Pedelecs 311 (15%) und auf den ÖPNV 245 Fahrten (12%). Im Durchschnitt entspricht das 17 ($SD = 26.0$, $Min = 1$, $Max = 156$) Dienstfahrten pro Nutzer. 90 Probanden („Nicht-Nutzer“) legten keine Dienstfahrt im Rahmen des Sharing-Systems zurück. Abbildung 16 gibt einen Überblick über die zurückgelegten Fahrten im Studienzeitraum mit Angabe der kumulierten Häufigkeiten (orange) und gefahrenen Kilometern (blau) pro Nutzungstag (nur Wochentage, ohne Feiertage und Betriebsruhe). Pro Nutzungstag legten die Nutzer im Durchschnitt 5 Fahrten ($SD = 2.6$, $Min = 1$, $Max = 15$) zu je 34 km ($SD = 28.6$, $Min = 3$, $Max = 220.7$) zurück.

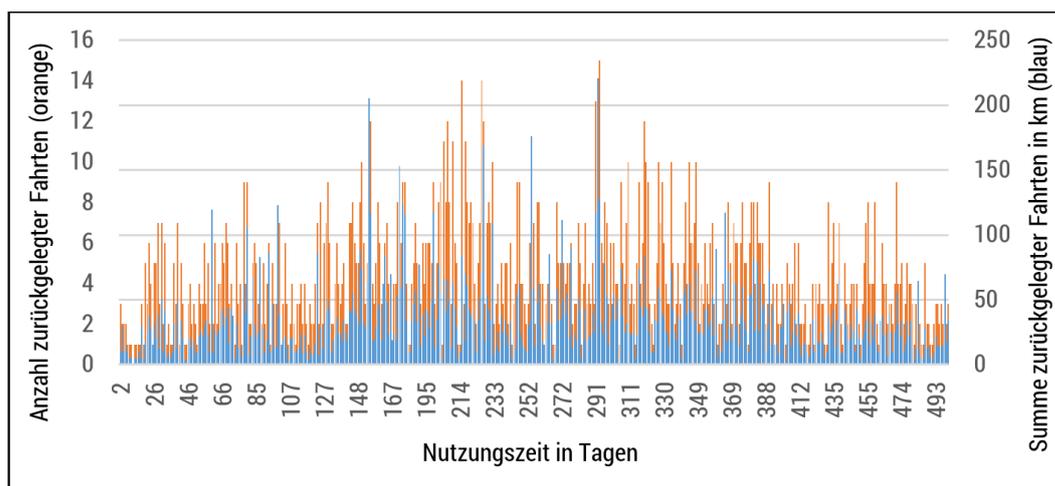


Abbildung 16: Anzahl (orange) und Distanz (blau) zurückgelegter Fahrten pro Nutzungstag im Erhebungszeitraum.

Die mit den BEVs erreichte räumliche Ausdehnung ist in Abbildung 17 visualisiert. Die Fahrten mit den Pedelecs sind in Abbildung 18 enthalten. Eine Rotfärbung entspricht einer hohen Nutzungsfrequenz der zurückgelegten Strecke. Auf blau dargestellten Strecken wurde nur vereinzelt gefahren.

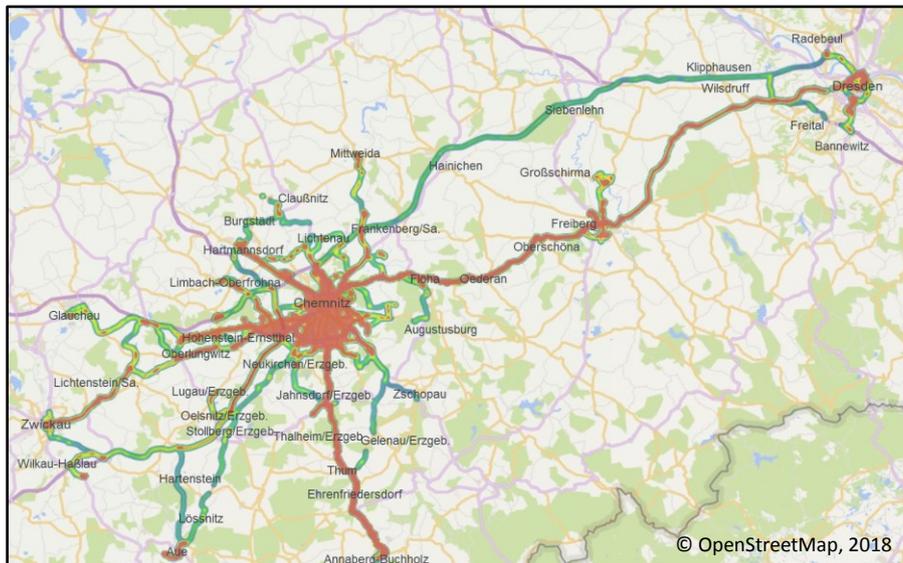


Abbildung 17: Räumliche Verteilung der zurückgelegten Strecken mit den BEVs im Studienzeitraum.

Anmerkung: Kartenquelle: www.openstreetmap.org

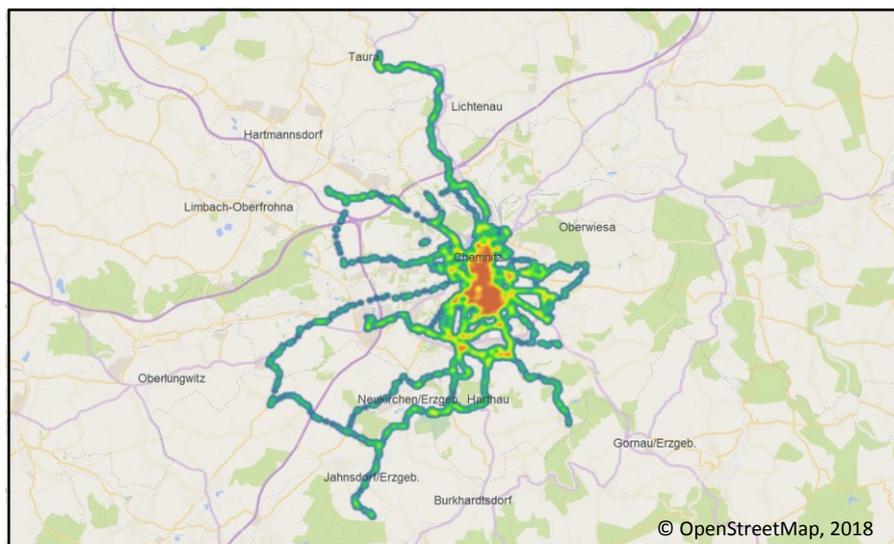


Abbildung 18: Räumliche Verteilung der zurückgelegten Strecken mit den Pedelecs im Studienzeitraum.

Anmerkung: Kartenquelle: www.openstreetmap.org

4.4.3 Nutzerbewertung

Die Onlinefragebögen beinhalteten eine Reihe von Bewertungsfragen zum Gesamtsystem und zur Einstellung gegenüber den einzelnen Systemkomponenten (z.B: BEVs und Zugangssystem). Im T2-Fragebogen nach 16 Wochen Nutzungszeit wurden die Probanden gebeten, ihre Einschätzung zu den einzelnen Systemkomponenten anzugeben. An der Befragung nahmen $N = 106$ Probanden teil. Die Antworten waren auf einer 6-stufigen Likert-Skala von 1 *stimme überhaupt nicht zu* bis 6 *stimme voll und ganz zu* anzugeben. In der Abbildung 19 sind die prozentualen Zustimmungswerte der Skala (summierte Werte im Bereich 4 bis 6) abgetragen.

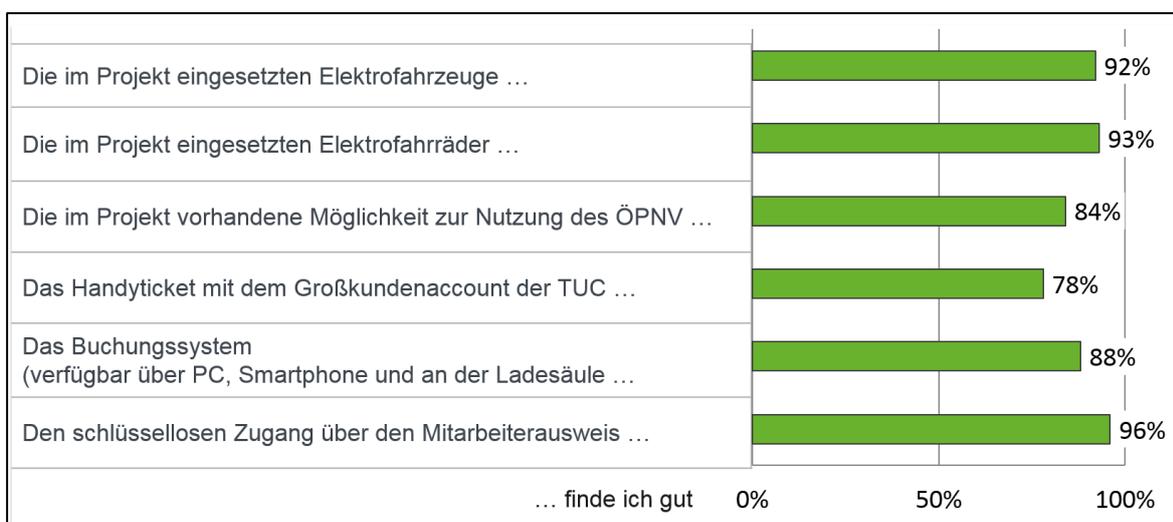


Abbildung 19: Zustimmungswerte zu den einzelnen Systemkomponenten des ECoMobility-Systems.

Anmerkung: $N_{T2} = 106$. 6-stufige Likert-Skala, %-Zustimmung entspricht dem Anteil der eingeschätzten Skalenwerte im Bereich 4-6.

Die hohen Zustimmungswerte sprechen für die positive Einstellung der ECoMobility-Probanden gegenüber allen Systemkomponenten. Lediglich die Nutzung des Handytickets wurde mit geringeren Zustimmungswerten beurteilt. Weitergehende Analysen deuteten auf die Bedeutsamkeit eines möglichst einfachen und unkomplizierten Zugangs für die Akzeptanzbewertung hin. Durch die Nutzung des Handytickets als eigenständige App wurde den Probanden ein zusätzlicher Zwischenschritt abverlangt, der die Einfachheit des Zugangs verkomplizierte und möglicherweise dadurch die Akzeptanz im Vergleich zu den anderen Systemkomponenten schmälerte.

Für die nachfolgenden Analysen der Akzeptanzbewertungen gegenüber dem ECoMobility-System als Ganzes wurden die Probanden in zwei Kategorien unterteilt [9]: Probanden, die mindestens eine Fahrt mit dem ECoMobility-System zurücklegten ($N = 46$; diese werden im Folgenden als „Nutzer“

bezeichnet) und Probanden, die noch keine Fahrt gebucht hatten ($N = 15$; diese werden im Folgenden als „Nicht-Nutzer“ bezeichnet). Beide Nutzergruppen nahmen regulär an den Online-Fragebogenerhebungen des zweiten Halbjahres 2017 teil. Die erste Erhebung erfolgte mit Beginn der Nutzungszeit (T_0), die zweite Erhebung erfolgte nach 4 Monaten (T_1) und die dritte Erhebung entspricht einer Nutzungszeit von 6 Monaten (T_2). Die Analyse erfolgte über die ersten 24 Nutzungswochen³. Die Nutzerstichprobe beinhaltete 61 Probanden (48 männlich, 13 weiblich). Im Mittel waren die Probanden 37 Jahre alt ($SD = 9.67$). Im Rahmen der Befragungen gaben die Probanden ihre Einschätzung hinsichtlich der wahrgenommenen Einfachheit der Nutzung des Systems (perceived ease of use; im Folgenden mit „PEU“ abgekürzt), wahrgenommenen Nützlichkeit des Systems (perceived usefulness; im Folgenden mit „PU“ abgekürzt) und der zukünftigen Nutzungsintention (behavioral intention to use; im Folgenden mit „BIU“ abgekürzt) an. Die Antworten wurden jeweils auf einer 5-stufigen Likert-Skala von 1 *stimme überhaupt nicht zu* bis 5 *stimme voll und ganz zu* gegeben. Beispielitems waren u.a. „Die Nutzung des Systems war einfach für mich zu lernen“ (PEU), „Insgesamt finde ich das System sehr nützlich“ (PU), „Ich beabsichtige das System auch in Zukunft zu nutzen“ (BIU). Jede Skala bestand aus 6 Einzelitems.

Die Akzeptanzbewertungen des ECoMobility-Systems waren über die 6 Monate hinweg konstant hoch (vgl. Abbildung 20). Ein signifikanter Zeiteffekt konnte nicht identifiziert werden ($F_{PEU}(2, 59) = 1.34, p = .265, \eta^2 p = .02$; $F_{PU}(2, 59) = .11, p = .885, \eta^2 p = .00$; $F_{BIU}(2, 59) = 1.32, p = .271, \eta^2 p = .02$). Zwischen Nutzern und Nicht-Nutzern konnten Inkonsistenzen hinsichtlich ihrer Akzeptanzbewertung identifiziert werden. So deuten die deskriptiven Statistiken für PEU auf einen Akzeptanzanstieg für beide Gruppen hin. PU nahm bei Nutzern zu, hingegen bei Nicht-Nutzern ab. Die Werte für BIU blieben in beiden Gruppen nahezu gleich. Gruppenvergleiche zeigten einen signifikanten Unterschied zwischen Nutzern und Nicht-Nutzern für PU und BIU ($F_{PEU}(1, 59) = 2.57, p = .114, \eta^2 p = .04$; $F_{PU}(1, 59) = 10.45, p = .002, \eta^2 p = .15$; $F_{BIU}(1, 59) = 6.45, p = .014, \eta^2 p = .10$). Nutzer berichteten höhere Akzeptanzwerte im Vergleich zu Nicht-Nutzern des Systems, was das Potential für die Schaffung von Erfahrungswerten in der Interaktion mit neuen Systemen unterstreicht.

³ Ergebnisse sind Bestandteil der Veröffentlichung: Günther, M., Müller-Blumhagen, S., & Krems, J.F. (2017). The importance of acceptance for the usage of multimodal sharing systems in corporate transportation. *ETC: European Transport Conference*. Barcelona, Spain

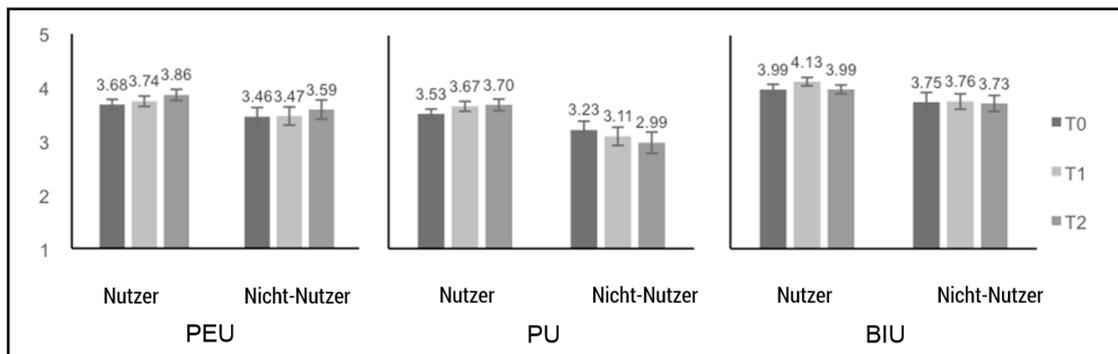


Abbildung 20: Akzeptanzbewertungen hinsichtlich des ECoMobility-Systems zwischen Nutzern und Nichtnutzern über eine Nutzungszeit von 6 Monaten.

Anmerkung: $N_{Nutzer} = 46$, $N_{Nicht-Nutzer} = 15$. Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler. Skalennittelwerte stehen über den Balken.

4.4.4 Anreizgestaltung

Das Nutzungsverhalten der Probanden wurde einerseits hinsichtlich ihrer Verkehrsmittelwahl und andererseits hinsichtlich dem Fahrverhalten mit den BEVs beeinflusst. Dazu wurde in der Web-App eine Statistikseite programmiert. Über diese wurden den Probanden Informationen zu den genutzten Verkehrsmitteln auf ihren zurückgelegten Wegen (Abbildung 21, links) und zum Energieverbrauch mit den BEVs (Abbildung 21, rechts) präsentiert.

Diese Statistiken zur Beeinflussung der Verkehrsmittelwahl umfassten die Verteilung der genutzten Verkehrsmittel, den Anteil an der Nutzung nachhaltiger Verkehrsmittel (Fahrrad und ÖPNV) an allen Fahrten und diese im Vergleich zu allen anderen Probanden im Projekt (Community). Zusätzlich war ein Nutzerranking enthalten, über den die Werte der 10 nachhaltigsten (bzw. energieeffizientesten) Fahrer angezeigt wurden. In einer späteren Studienphase wurden diese Angaben um den Energieverbrauch beim Fahren mit den Elektrofahrzeugen erweitert (Abbildung 21, rechts). Ziel war in der ersten Phase die Steigerung des Anteils an der Nutzung von Bus- und Pedelec-Fahrten und in der zweiten Phase die Reduktion des Energieverbrauchs mit den BEVs.



Abbildung 21: Auszüge aus der Statistikseite zur Motivation der Verkehrsmittelwahl (links) und zum energieeffizienten Fahrverhalten mit BEVs (rechts).

Die Baseline innerhalb der ersten Phase zur Beeinflussung der Verkehrsmittelwahl dauerte von August 2016 bis September 2016 und enthielt keinerlei Informationen seitens der Statistiken. Anschließend erfolgte die Präsentation der auf der linken Seite der Abbildung 21 dargestellten Informationen. Die Winterphase Oktober 2016 bis Februar 2017 wurde für die Analyse außer Acht gelassen und lediglich der Zeitraum von März 2017 bis Mai 2017 als Vergleich herangezogen. Durch den Einsatz der Statistiken konnte die Verkehrsmittelwahl kurzfristig beeinflusst werden und der Anteil an nachhaltigen Verkehrsmitteln auf 32.3% erhöht werden. Der Anteil an nachhaltigen Verkehrsmitteln in der Baseline betrug 31.2%. Das anfängliche Interesse an der Nutzung der Pedelecs führte mit hoher Wahrscheinlichkeit zu diesem hohen Anfangswert. Die nachfolgenden Anteile an nachhaltigen Verkehrsmitteln fielen in einem vergleichbaren Zeitraum im Jahr 2018 auf unter 20%.

In der zweiten Phase zum energieeffizienten Fahren⁴ wurden die unterschiedlichen Informationsbestandteile über die Statistikseite separat untersucht und zusätzlich mit einem finanziellen Gewinn verknüpft. Die Baseline fand von Oktober 2016 bis Februar 2017 statt und enthielt ebenfalls keinerlei Angaben zum Energieverbrauch der BEVs. Es schloss sich von März 2017 bis Mai 2017 eine erste Interventionsphase mit den grünen Angaben zum eigenen Energieverbrauch der Probanden an (Feedback). Von Juni 2017 bis August 2017 erfolgte eine zweite Interventionsphase mit den blauen Abgaben und der Rangliste zum Vergleich mit der Community (Gamification). Durch die Statistiken reduzierte sich der Energieverbrauch beim Fahren mit den BEVs signifikant ($F(2, 22) = 3.89$; $p = .027$; $\eta^2_p = .14$; $M_{Baseline} = 37.49$, $SD = 9.24$; $M_{Feedback} = 35.94$, $SD = 10.97$; $M_{Gamification} = 31.89$, $SD = 6.43$). Der größte Effekt in der Reduktion des Energieverbrauchs konnte aufgrund des Vergleichs mit der Community (Gamification) erzielt werden [10]. In der letzten Interventionsphase von September 2017 bis November 2017 wurde den Probanden zusätzlich ein finanzieller Gewinn auf den ersten drei Plätzen in Aussicht gestellt. Der finanzielle Gewinn brachte darüber hinaus keinen signifikanten Mehrwert an Einsparungspotentialen beim Fahren mit den BEVs im Vergleich zur Gamification.

⁴ Ergebnisse sind Bestandteil der Veröffentlichung: Günther, M., & Krems, J.F. (2018). How To Motivate ECo-driving With Battery Electric Vehicles? – The Positive Influence Of Consumption Related Feedback And Gamification. *ICAP: International Congress on Applied Psychology*, Montréal, Canada

4.4.5 Routingstudie

Das neu entwickelte Display zur energieeffizienten Routenwahl für Elektrofahrzeuge (vgl. 2.3.7) wurde in einer eigens dafür konzipierten Studie evaluiert [7]. Wie eingangs bereits erwähnt, enthielt das Display neben der Angabe von der benötigten Zeit und den zu fahrenden Kilometern auch die benötigte Energie für eine angegebene Strecke (Abbildung 22, links). Den Probanden wurden verschiedene Routenoptionen präsentiert und eine Auswahl zwischen der energieeffizientesten (grün), kürzesten (rot) und schnellsten (blau) Route war möglich. Ein konventionelles Display (Abbildung 22, rechts) enthielt im Vergleich dazu keine Angaben zur Energieeffizienz einer Strecke und diente als Vergleichsdisplay in der Kontrollgruppe.

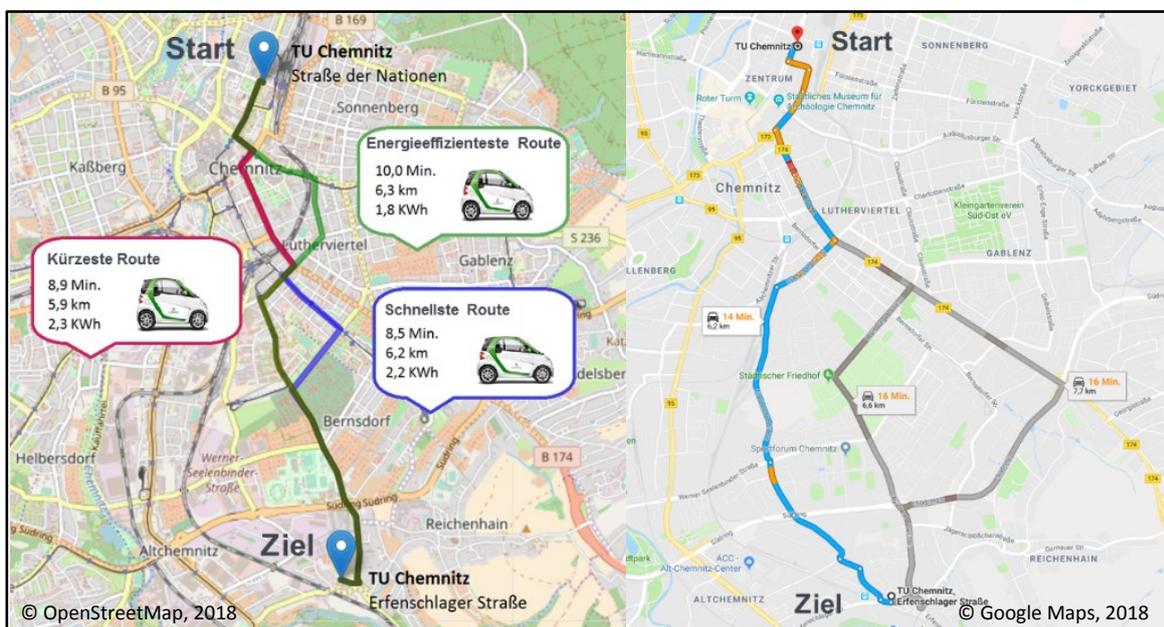


Abbildung 22: Auszüge aus der Statistikseite zur Motivation der Verkehrsmittelwahl (links) und zum energieeffizienten Fahrverhalten mit BEVs (rechts).

Zur Evaluation des neu konzipierten energieeffizienten Routingdisplays wurde eine Fahrstudie mit zwei Gruppen zu je 37 Personen durchgeführt⁵. Dabei wurden die beiden oben dargestellten Displays (energieeffizientes Routingdisplay vs. konventionelles Display) hinsichtlich ihrer Bedienfreundlichkeit und Akzeptanz untersucht. Beide Gruppen legten dazu zwei identische etwa 7km lange Testfahrten zurück (jeweils Start am Universitätsteil Straße der Nationen und Ziel am

⁵ Ergebnisse sind Bestandteil der Veröffentlichung: Müller-Blumhagen, S., Günther, M., & Krems, J.F. (2018). Using enriched OSM data for energy efficient routing. *SOTM: State of the Map*, Milan, Italy.

Universitätsteil Erfenschlag). Zwischen den beiden Gruppen konnten keine Unterschiede hinsichtlich der Bewertung der Benutzerfreundlichkeit und Akzeptanz der beiden Displays festgestellt werden ($F_{Usability}(1, 73) = .08, p = .777, \eta^2 = .00$; $F_{Satisfaction}(1, 73) = .04, p = .850, \eta^2 = .00$; $F_{Usefulness}(1, 73) = .52, p = .473, \eta^2 = .01$). In der Gruppe mit dem konventionellen Navi würden 95% der Nutzer die schnellste Route wählen. Hingegen präferieren Probanden die energieeffiziente Route gegenüber der kürzeren/schnelleren Route (57%) in der Gruppe mit dem energieeffizienten Routingdisplay. Weiterhin wurde der Energieverbrauch auf der, laut Display, energieeffizientesten Route mit der vorgeschlagenen Route durch das konventionelle Routingdisplay ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass Fahrten unter Nutzung des ECoMobility-Displays mit geringerem Stromverbrauch ($M_{EG} = 14.5 \text{ A}, M_{KG} = 15.7 \text{ A}; F(1, 52) = 4.66, p = .018$) und geringerem Batterieladestandsverbrauch ($M_{EG} = 5.3 \%, M_{KG} = 6.1 \%; F(1, 52) = 6.72, p = .006$) einhergehen.

Abschließend wurden die Probanden zu ihren Gestaltungsvorschlägen bei Routingdisplays befragt. Die Antworten der Probanden ($N = 74$) verteilten sich über verschiedene Kategorien. Mehrfachnennungen zwischen den Kategorien waren möglich. Der Großteil der Probanden wünschte sich mit 45% der Nennungen zusätzliche Angaben zu Einsparungen auf verschiedenen Routenoptionen (Energie, CO₂, finanziell), gefolgt von detaillierten Streckeninformationen (Straßentyp, Länge, Höhenprofil, Ampeln) mit 40% der Nennungen. 33% der Probanden wünschten sich die Einbindung von Zusatzinformationen zum Energieverbrauch und zur Reichweite in einem Routingdisplay für BEVs. Angaben zu Verkehrsaufkommen und Staus wurden mit 28% der Nennungen vorgeschlagen. Weitere 20% der Probanden konnten sich Feedback und Empfehlungen zum Fahrstil in einem Routingdisplay vorstellen. 14% der Nennungen entfielen auf Angaben zu Fahrzeiten auf unterschiedlichen Routenoptionen. Weitere 14% wünschten sich keine weiteren Verbesserungen und 11% der Nennungen beinhalten sonstige Wünsche, wie z.B. Informationen zu Lademöglichkeiten und aktuelle Geschwindigkeit.

5 Forschungsbereich EConomic

Im Schwerpunkt EConomic wurden erfolgsversprechende Geschäftsmodelle aus der Sicht aller beteiligten Akteure untersucht. Diese Geschäftsmodelle wurden zudem angepasst, dass eine ökonomische Tragfähigkeit zu erwarten ist. Weiterhin konnten Wirtschaftlichkeitsbewertungen hinsichtlich Anreizsystemen zur umweltschonenden Fahrweise und des Ladens mit regenerativer Energie durchgeführt werden. Ein Ausschnitt der erfolgten Untersuchungen ist im Folgenden zu sehen.

5.1 Zielstellung/Ausgangslage

Den Anforderungen des hohen Stellenwertes der Mobilität kann durch einen effizienten Ressourceneinsatz auch unter Berücksichtigung der Abgas- und Lärmemission nachgekommen werden. Für die Erreichung gesetzter Klimaschutzziele und für den sparsamen Umgang mit fossilen Brennstoffen sind Elektromobilitätskonzepte vielversprechend. In Kombination damit sind Geschäftsmodelle für intermodale Elektromobilitätskonzepte für viele wirtschaftliche Akteure interessant und relevant. Bisher werden entsprechende Modelle nur als pilotartige Insellösungen angeboten. Im Schwerpunkt EConomic wurden Geschäftsmodellkonzepte der vernetzten Elektromobilität aus Sicht der beteiligten Akteure untersucht und tragfähige Geschäftsmodelle zur Realisierung eines Gesamtmobilitätssystems entwickelt.

5.2 Umsetzung

Im Projektverlauf wurden zwei Probandenbefragungen durchgeführt. Die Daten wurden in Form eines Onlinefragebogens erhoben. Es wurde ausschließlich auf Teilnehmer am Projekt ECoMobility zurückgegriffen. Auf Basis dieser Daten konnten die erfolgsversprechendsten Geschäftsmodelle identifiziert, näher untersucht und spezifiziert werden, um eine voraussichtliche wirtschaftliche Tragfähigkeit zu erreichen. Zusätzlich konnte auf weitere Fragestellungen, wie die Anreizgestaltung zur ökologischen Fahrweise, den Mobilitätsträgervergleich auf Dienstwegen oder die Energiespeicherbewertung eingegangen werden.

5.3 Eingesetzte Methoden

Neben den genannten Befragungen konnte auf Ergebnisse vorangegangener oder externer Studien zurückgegriffen werden. Bei der Ausgestaltung der Geschäftsmodelle kamen Szenariotechniken zum Einsatz. Für die qualitative Bewertung verschiedener Geschäftsmodelle sowie die Geschäftsmodellauswahl wurden das Konzept nach Schallmo sowie das Vorgehensmodell nach Götze und Rehme [11] genutzt. Die quantitative Auswertung der erfolgsversprechendsten

Geschäftsmodelle wurde unter Zuhilfenahme des Target Costing sowie der Kapitalwertmethode mit anschließender Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

5.4 Ergebnisse

Im Projektverlauf konnten aussagekräftige Ergebnisse hinsichtlich erfolgversprechender Geschäftsmodelle gewonnen werden. Neben Befragungen zu potentiell erfolgversprechenden Geschäftsmodellen wurden Befragungen zur Einstellung der Nutzer gegenüber Sharingangeboten und Elektrofahrzeugen erhoben (s. Abbildung 23).

5.4.1 Befragung zur Nutzung und Bewertung von Sharing-Diensten

Die Ergebnisse des ersten Fragebogens zur Nutzerakzeptanz wurden im ersten und zweiten Quartal 2016 erhoben.

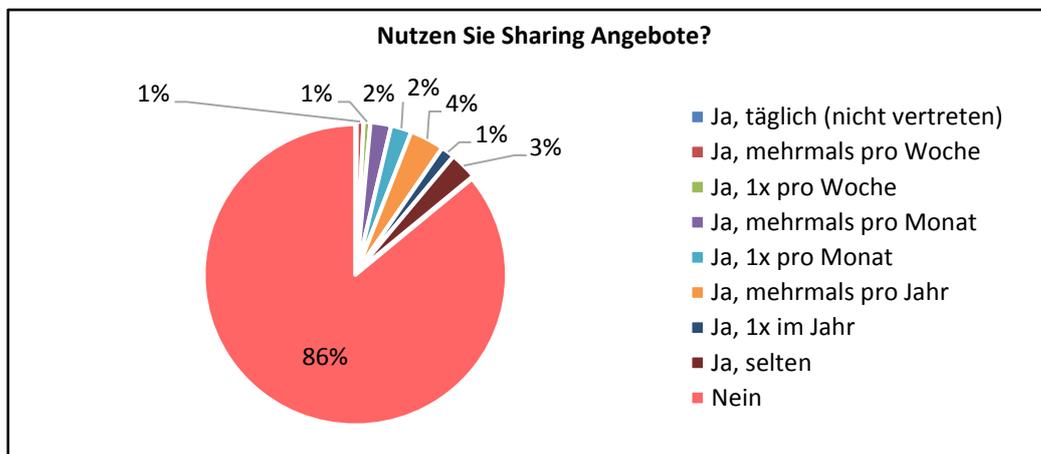


Abbildung 23: Nutzung von Sharing Angeboten durch die Probanden.

14 % der Probanden nutzten bereits außerhalb des Projektes Sharing-Angebote. Dabei fällt die Nutzung von Carsharing höher aus als diejenige von Bikesharing. Nur 7 % der Befragten besaßen selbst ein Elektrofahrzeug. Dies verdeutlicht den hohen Innovationscharakter und die positive Außenwirkung auf die Erhöhung der Akzeptanz von Elektrofahrzeugen durch die Bereitstellung eines E-Mobility Sharingkonzeptes im Projekt. Im Folgenden werden einige Befragungsergebnisse hinsichtlich der Akzeptanz von Elektrofahrzeugen ausgewertet. In Abbildung 24 ist gut zu sehen, dass vor allem monetäre Aspekte eine entscheidende Rolle beim Kauf eines Elektrofahrzeuges spielen.

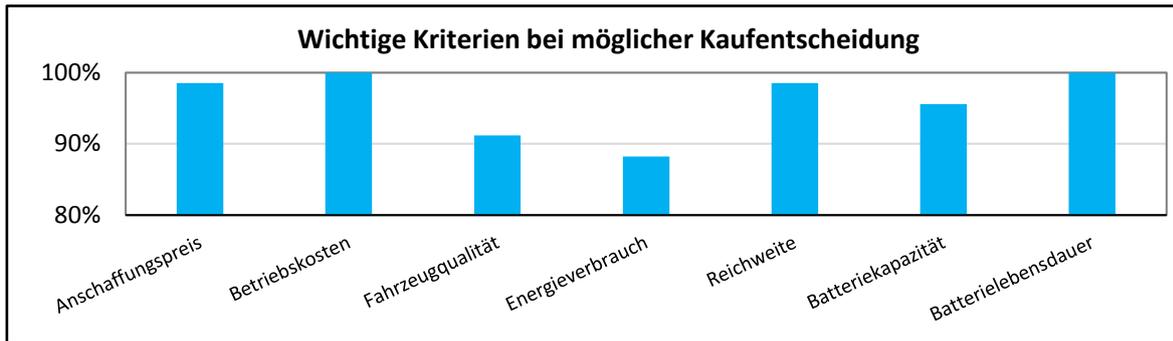


Abbildung 24: Die sieben wichtigsten Kriterien bei der Kaufentscheidung für ein Elektrofahrzeug.

Weiterhin ist für 93 % der Befragten eine mögliche Kosteneinsparung beim Umstieg auf Elektromobilität wichtig. Umweltaspekte sind für 78 % der Probanden ausschlaggebend. Diese Bewertungen können auch an Abbildung 25 nachvollzogen werden. Hohe Anschaffungskosten stellen ein weitaus höheres Hemmnis für den Kauf eines elektrisch getriebenen Fahrzeuges dar, als Zweifel an ökologischen Vorteilen.

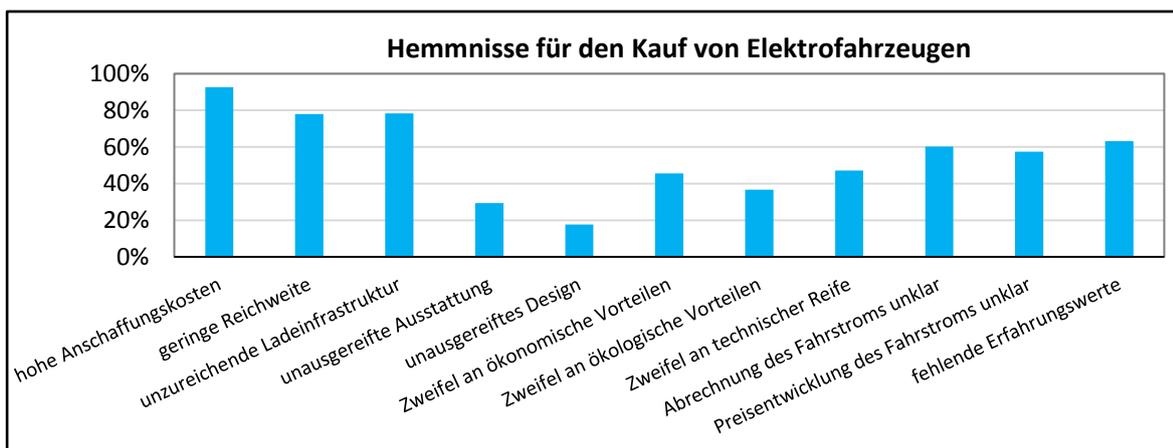


Abbildung 25: Gründe für den Nicht-Umstieg auf Elektromobilität.

Zusätzlich gaben die Probanden eine hohe Wichtigkeit von Schnellladetechnologien an. Kontaktlose Lademöglichkeiten (induktives Laden) haben hingegen einen geringeren Stellenwert. Es zeichnet sich eine Aversion gegenüber Batteriewechselmodellen ab. Ladestationen zu Hause und am Arbeitsplatz werden tendenziell als wichtiger bewertet als Lademöglichkeiten im öffentlichen Raum. 68 % der Befragten haben derzeit keinen Zugang zu entsprechenden Lademöglichkeiten. 90 % der Probanden sind mit der derzeit zur Verfügung stehenden Ladeinfrastruktur unzufrieden. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass für die Nutzer technische und ökonomische Fakten wichtiger sind als ökologische Daten. Eine gut ausgebaute Ladeinfrastruktur und eine hohe Reichweite stellen immer noch die wichtigsten Enabler der Elektromobilität dar.

5.4.2 Bewertung der Potentiale von Geschäftsmodellen

Der zweite Fragebogen, welcher im zweiten und dritten Quartal 2017 durch die Teilnehmer beantwortet wurde, erob die Erwartungen bezüglich unterschiedlicher Geschäftsmodelle für Mobilitätskonzepte und Ladedienstleistungen. Bei maximal positiver Bewertung in den Dimensionen Marktpotential, Markteintrittsbarrieren, Umsetzungsbarrieren sowie Nutzungsaussicht ergäbe sich ein eingeschätztes Gesamtpotential von 1. Somit steht ein hoher quantitativer Wert für ein hohes Potenzial des Geschäftsmodells. Die Geschäftsmodelle wurden in drei Tracks geclustert. Das jeweils erfolgversprechendste Geschäftsmodell aus jedem Track wurde näher untersucht.

Track A – Vermittlung von Mobilitätsdiensten: A1 – Integrierte Mobilitätsplattform

Track B – Basisdienste und unterstützende Dienste: B1 – Umstiegsassistent

Track C – Transport- und Beförderungsdienstleistungen C2 – Corporate Carsharing

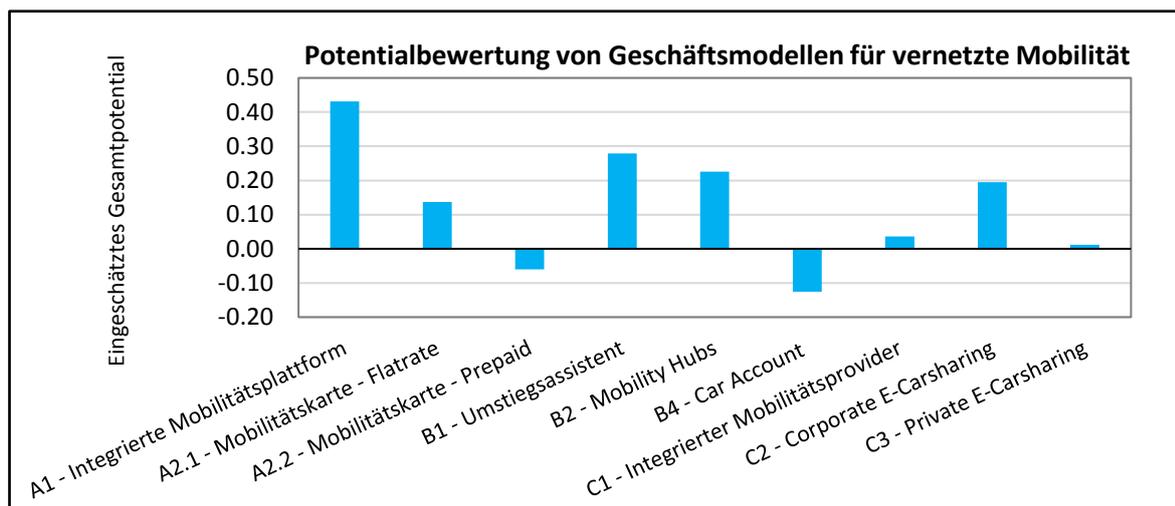


Abbildung 26: Auswahl der Einschätzung der Potentiale der Geschäftsmodelle vernetzter Mobilität.

Die Potentialbewertung von Geschäftsmodellen für vernetzte Mobilität zeigt deutlich, dass nur einzelne Modelle als erfolgversprechend eingeschätzt werden. Dabei ist auffällig, dass bekannte Modelle als tendenziell erfolgversprechender eingeschätzt werden. So wird beispielsweise das Corporate E-Carsharing erfolgversprechender bewertet, als das Private E-Carsharing. ECoMobility stellt seinen Nutzern schließlich eine Form des Corporate E-Carsharing bereit, hingegen haben laut Abbildung 23 nur wenige Nutzer außerhalb des Projektes (auch privat) entsprechende Sharingangebote genutzt.

Auch bei der Bewertung von Ladedienstleistungen ergeben sich klare Präferenzen der Probanden. Auch hier wurden drei Tracks unterschieden. Die drei erfolgversprechendsten Ladegeschäftsmodelle sind:

Track A – Chargepoint Sharing:

A3 – Light and Charge

Track B – Angebot hybrider Leistungsبündel:

B1 – Charge and Park

Track C – Optimierte Standortkonzepte:

C2 – Destination Charging

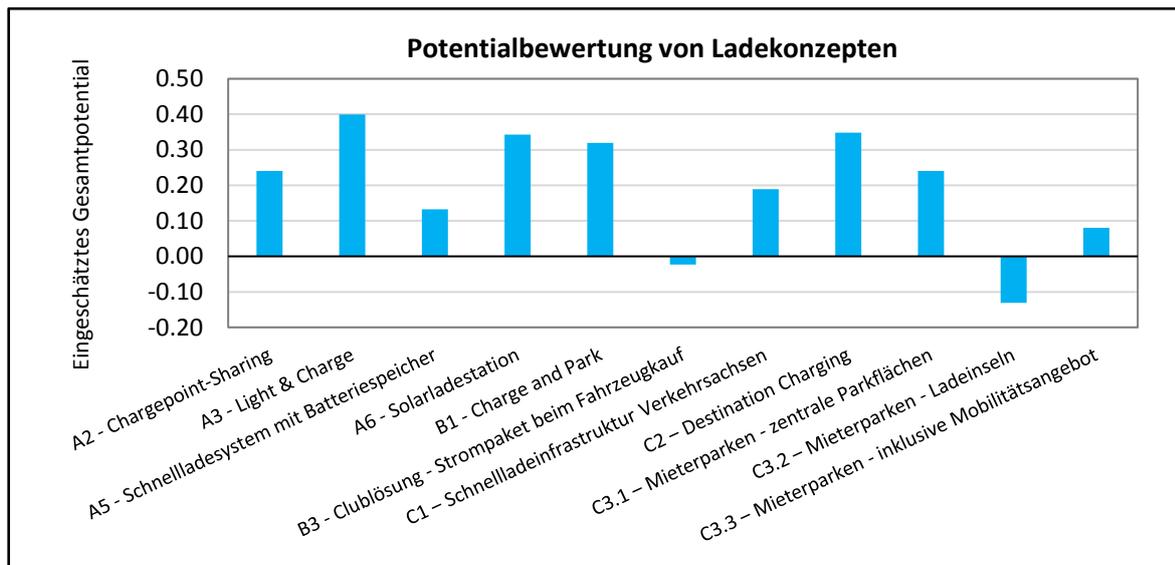


Abbildung 27: Auswahl der Einschätzung der Potentiale der Ladekonzept-Geschäftsmodelle.

Die Befragung zeigt einen Trend zu einer möglichst hohen Anzahl von Ladestationen, an welchen die Nutzer die Fahrzeuge aufladen können. Exklusive Lademöglichkeiten wie Clublösungen oder Ladeinseln für Mieter erzeugen tendenziell niedrigere Erfolgsaussichten.

Die sechs erfolgversprechendsten Geschäftsmodelle wurden nach dem Bewertungskonzept von Schallmo hinsichtlich der Strategiefelder Leistungs-/Nutzen-, Partner-, Wertschöpfungs-, Kunden- und Finanzdimension untersucht [12]. Ein Geschäftsmodell ist tragfähig, wenn es in der Lage ist, mittel- und langfristig die Existenz des Anbieters zu sichern [13]. Dazu müssen die Kernkompetenzen des Geschäftsmodells nicht imitierbare, einzigartige und nur schwer substituierbare Ressourcen bereitstellen [14]. Die Auswertung der Befragungen sowie weiterführende Analysen haben ergeben, dass ein einzelnes isoliertes Geschäftsmodell keinen ausreichenden Kundennutzen generieren kann. Die Geschäftsmodelle sind auf Synergien und Zusammenarbeit mit Weiteren angewiesen. Durch diese Bündelung können Wettbewerbsvorteile ausgebaut und kritische Erfolgsfaktoren besser aufgebaut und verteidigt werden.

5.4.3 Bewertung der innerstädtischen Mobilität von Universitätsmitarbeitern

Durch die Bereitstellung und Nutzung der Elektrofahrzeuge konnten 43 % der CO₂-Emissionen gegenüber der Mobilität mit Fahrzeugen mit Ottomotor eingespart werden (unter Berücksichtigung des CO₂-Emissionsfaktors des deutschen Strommixes für 2017 [15]). Vor allem im Stadtverkehr kann keine eindeutige Aussage über die ökonomische und ökologische Vorteilhaftigkeit eines Antriebskonzeptes gemacht werden (vgl. [16]). Bei der ökonomischen Bewertung müssen neben den Kilometerkosten weitere Aspekte, wie bessere Parkmöglichkeiten (spezielle BEV Parkplätze) und eine Vermeidung von Tankzeiten (Fahrzeug lädt, während der Parkdauer) berücksichtigt werden. Eine besondere Bedeutung haben bei Dienstwegen die Wegezeiten, da diese auch als Verlust produktiver Arbeitszeit angesehen werden können. Wegezeiten werden vor allem von der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit bestimmt. Im Rahmen des Projekts wurde für Chemnitz eine Durchschnittsgeschwindigkeit mit dem PKW von ca. 29,5 km/h ermittelt. Mit dem Pedelec oder ÖPNV liegt diese bei ca. 20,0 km/h.

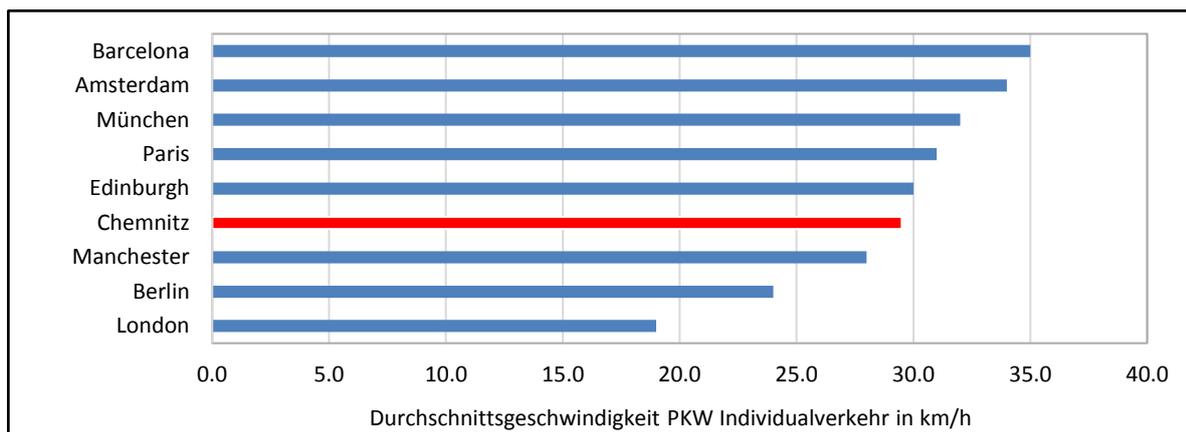


Abbildung 28: Durchschnittsgeschwindigkeit in europäischen Städten mit dem PKW [17].

Abbildung 29 zeigt den Gesamtkostenverlauf der Mobilitätsarten über die jährliche Fahrleistung. Die ökonomischen Kenndaten sind aber beim Thema der innerstädtischen Mobilität immer zu relativieren. So sind an dieser Stelle positive Effekte des Radfahrens [18] oder des ÖPNV [19] sowie die negativen Einflüsse des autobasierten Individualverkehrs in Städten [20] nicht beachtet. Ebenfalls konnte die hohe Volatilität der Reisezeit über den Tagesverlauf nicht berücksichtigt werden. Ohne die Berücksichtigung des Arbeitszeitverlustes wäre die Fortbewegung mit dem Rad am günstigsten und mit dem BEV am kostenintensivsten.

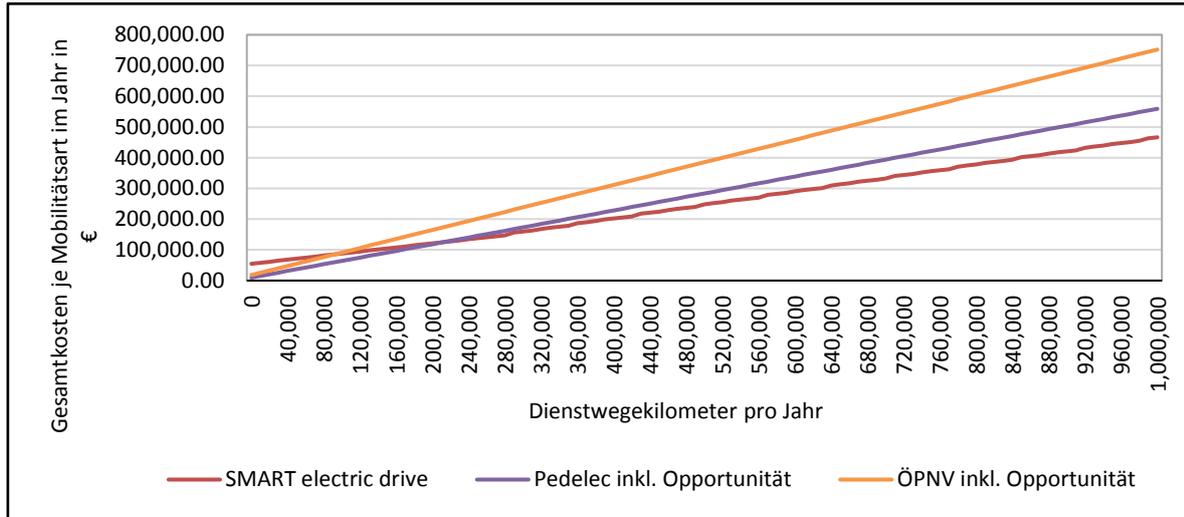


Abbildung 29: Mobilitätskosten der Mobilitätsarten in Abhängigkeit der jährlichen Dienstwegelänge mit Opportunitätskosten.

Die relative Vorteilhaftigkeit des Individualverkehrs mit dem BEV kann durch die Veränderung verschiedener Randbedingungen beeinflusst werden.

In Tabelle 3 und 4 werden bei den Kosten des ÖPNV Kosten für einen Großkundenaccount berücksichtigt. Wegen des Rückgriffs auf Projektdaten wird weiterhin davon ausgegangen, dass mit diesem nur Einzelfahrscheine gekauft werden. Dies stellt im Fall der Chemnitzer Verkehrs AG (CVAG) für den Anwendungsfall die teuerste Option dar. Durch einen möglichen zukünftigen Rückgriff auf günstigere Tarifmodelle wie übertragbare Wochen-, Monats- oder Jahreskarten könnten die Kosten damit erheblich gesenkt werden, sodass es wahrscheinlich ist, dass die Nutzung des Personennahverkehrs eine kostengünstigere Variante bietet.

Einflussgröße	kritischer Wert, ab welchem Mobilität mit Pedelec relativ vorteilhaft wäre	kritischer Wert, ab welchem Mobilität mit ÖPNV relativ vorteilhaft wäre
Distanz zum Parkplatz	0,13 km	0,40 km
Parkgebühr	0,54 € / Parkvorgang	1,67 € / Parkvorgang
Geschwindigkeitsdifferenz (aktuell 9,5 km/h)	7,65 km/h	- 1,35 km/h → der ÖPNV müsste 1,35 km/h schneller sein als der PKW
Leasingzahlung (aktuell 3360 €/a)	5.540,58 €/a	15.034,44 €/a
Energiekosten	0,40 €/kWh	0,41 €/kWh
vermiedene Ausfalltage der Angestellten¹	47,82 d/a	256,08 d/a

Tabelle 3: Übersicht kritischer Werte zur Generierung von Vorteilhaftigkeit von ÖPNV- und Pedelecnutzung gegenüber der Mobilität mit E-PKW.

Anmerkungen: ¹ Aktive Fortbewegung auf Dienstwegen kann die Gesundheit positiv beeinflussen und Krankheitstage verhindern [21]. Die vermiedenen Ausfalltage beziehen sich auf alle regelmäßigen Mobilitätsnutzer der Universität (48,48 % der Gesamtbelegschaft). Durch den Wegfall eines Krankentages je Kalenderjahr jedes 22. Mobilitätsnutzers würde sich der Ausbau der Pedelec-Mobilität lohnen. Für eine Vorteilhaftigkeit des ÖPNV müsste bei jedem vierten Nutzer ein Rückgang um einen Krankentag zu verzeichnen sein.

	PKW	Pedelec	ÖPNV
Mobilitätskosten mit ECoMobility-System inkl. Opportunitätskosten	0,45 €/km	0,55 €/km	0,77 €/km ²
Mobilitätskosten ohne ECoMobility-System inkl. Opportunitätskosten	1,25 €/km	1,00 €/km	1,32 €/km
relative Ersparnis durch Einsatz des ECoMobility-Systems	64,00 %	45,00 %	41,67 %

Tabelle 4: Vergleich der Mobilitätskosten mit dem und ohne das ECoMobility-System [22] auf innerstädtischen Dienstwegen.

Anmerkungen: ² mit Berücksichtigung der anteiligen Kosten des Großkundenaccounts zur ÖPNV-Buchung; die Fahrkosten basieren auf dem Kauf von Einzelfahrkarten.

Tabelle 4 zeigt, dass die Kosten des Betriebes eines internen Mobilitätssystems für kurze und mittlere Dienstwege für die TU Chemnitz geringer wären, als die Beibehaltung des aktuellen Abrechnungsverfahrens. Der erhebliche Aufwand der Dienstreiseabrechnung sowie der Reisekostenvergütung übersteigt die Kosten für den Betrieb eines ECoMobility ähnlichen Systems.

Bei der Nutzung von Pedelecs muss berücksichtigt werden, dass die längere Reisezeit durch langsamere Fortbewegung aktiv verbracht wird, was die Kreativität der Mitarbeiter fördert, Stress abbaut und somit höhere Produktivität fördert [23]. Weiterhin sind die Anmerkungen zu Tabelle 3 und 4 zu beachten, sodass bei einer Anpassung des Tarifmodells eine erhebliche Kostenminderung für die Nutzung des Personennahverkehrs zu erwarten wäre.

5.4.4 Übertragung der Ergebnisse auf Geschäftsmodelle der Elektromobilität

Die in Track C – Transport- und Beförderungsdienstleistungen als erfolgsversprechend bewertete Dienstleistung entspricht im Wesentlichen dem ECoMobility-System und kann direkt mit Hilfe der Projektdaten ökonomisch untersucht werden. Es wurden jeweils drei Szenarien (pessimistisch; Trend [24, 25]; optimistisch) mit der Option des KFZ-Leasing oder Kaufs untersucht. Als Zielpreis wurden recherchierte Nutzungsentgelte von potentiellen Konkurrenten genutzt.

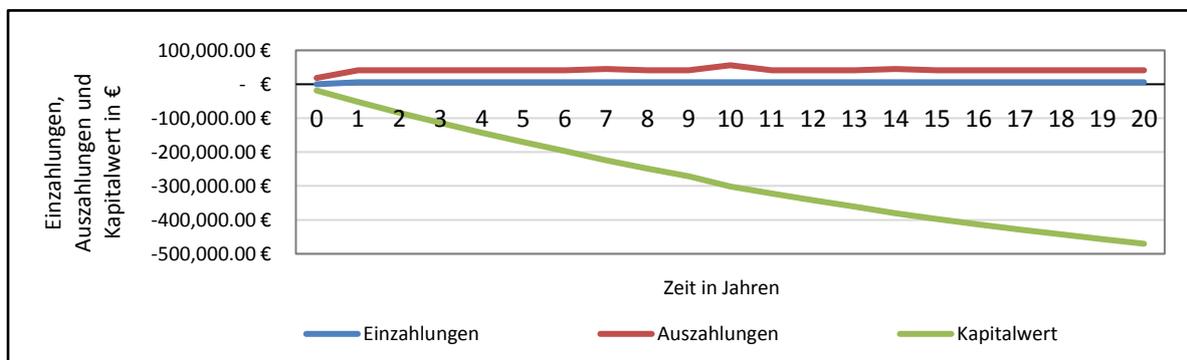


Abbildung 30: Verlauf der Ein- und Auszahlungen sowie des Kapitalwertes im Trendszenario bei Leasing der Fahrzeuge.

	Leasing	Kauf
Kapitalwert im pessimistischen Szenario	- 470.308,29 €	- 509.581,70 €
Kapitalwert im Trendszenario	- 569.555,74 €	- 578.704,12 €
Kapitalwert im optimistischen Szenario	- 850.673,08 €	- 738.534,49 €

Tabelle 5: Übersicht der Kapitalwerte des Corporate E-Carsharing.

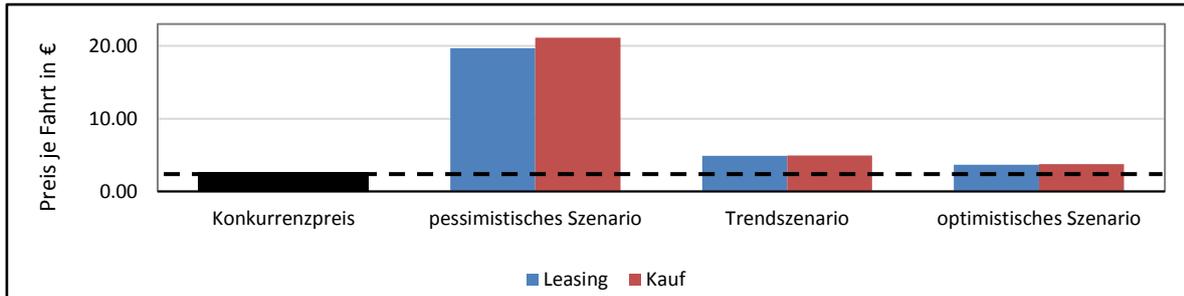


Abbildung 31: Vergleich der für neutralen Kapitalwert notwendigen Fahrtpreise bei exklusiver Nutzung durch Geschäftskunden.

Die beiden Abbildungen verdeutlichen, dass ein exklusives Carsharing für Unternehmenskunden nicht lukrativ oder mit sehr hohen Nutzungsgebühren verbunden wäre.

Im Combined Corporate Carsharing können hingegen positive Kapitalwerte erzielt werden. Dieses Geschäftsmodell sieht eine zusätzliche Nutzung der Ressourcen durch private Kunden bei entsprechenden Überkapazitäten vor. Die Geschäftskunden erhalten Vorrang bei der Buchung.

	Leasing	Kauf
Kapitalwert im pessimistischen Szenario	-441.290,28 €	-424.642,27 €
Kapitalwert im Trendszenario	-352.753,15 €	197.291,81 €
Kapitalwert im optimistischen Szenario	-138.473,58 €	1.837.663,74 €

Tabelle 6: Übersicht der Kapitalwerte des Combined Corporate Carsharing.

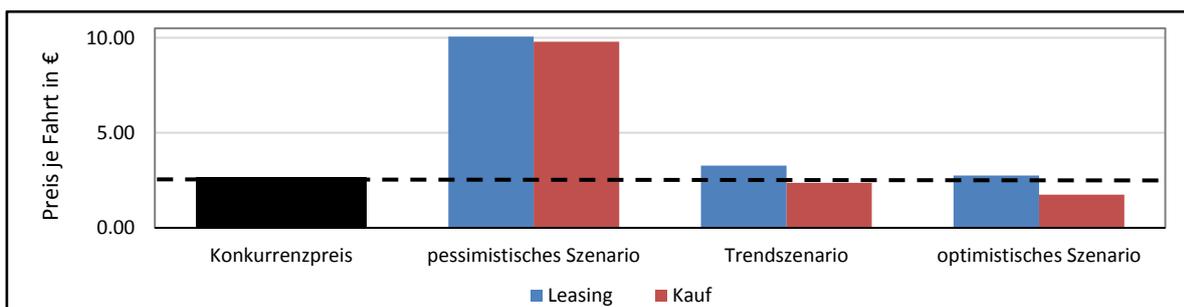


Abbildung 32: Vergleich der für neutralen Kapitalwert notwendigen Fahrtpreise bei Öffnung des Systems für Privatnutzer.

Im Gegensatz zur reinen geschäftlichen Nutzung im Corporate Carsharing können mit dem Combined Corporate Carsharing konkurrenzfähige Nutzungsentgelte generiert werden.

Die Ergebnisse bestätigen, dass die Bereitstellung eines E-Carsharing ausschließlich für Geschäftskunden nur schwer ökonomisch sinnvoll umzusetzen ist. Sobald freie Ressourcen zur Verfügung stehen, sollten diese für Privatnutzer angeboten werden.

5.4.5 Zahlungsbereitschaft der Nutzer

Aufgrund einer hohen Transparenz auf dem Mobilitätsmarkt ist von einer umfassenden Information der Nutzer über Konkurrenzprodukte auszugehen [26]. Die Preiselastizität des öffentlichen Nahverkehrs wird mit $< | -1 \% |$ (die Nachfrage fällt mit unter 1 % der relativen Preissteigerung) angegeben [27]. Dies gilt jedoch nur bei einem regulierten Markt [27], welcher im Falle des Carsharing nicht vorliegt. Die Preiselastizität von PKW-Fahrten beträgt -30% [28]. Dies gilt für die Mobilität mit dem eigenen Fahrzeug. Bei Sharing-Konzepten ist die Preiselastizität der Nachfrage höher [29] und hängt von zeitlichen und räumlichen Effekten sowie der Demographie und Einkommensstruktur des Standortes ab [27]. Die Preiselastizität der Nachfrage liegt nach Zusammenfassung der Daten im Bereich $> | -35 \% |$ (Bei einer Verdopplung der Nutzerentgelte würden mindestens 35 % der Fahrten entfallen.). Das würde bedeuten, dass bei den Szenarien mit negativem Kapitalwert eine Anhebung des Nutzerpreises (vgl. Tabelle 5 und

	Leasing	Kauf
Kapitalwert im pessimistischen Szenario	-441.290,28 €	-424.642,27 €
Kapitalwert im Trendszenario	-352.753,15 €	197.291,81 €
Kapitalwert im optimistischen Szenario	-138.473,58 €	1.837.663,74 €

Tabelle 6) zu einem Rückgang der Nutzerzahlen führen würde, was wiederum zu einer Senkung der Einzahlungen und Kapitalwertes führen würde.

5.4.6 Bewertung eines Batteriespeichers für regenerativ erzeugte Energie

Externe Studien ergaben, dass 80 % der potentiellen Elektrofahrzeugnutzer bereit wären, umzusteigen, wenn ihnen zugesichert werden würde, dass sie ihr Fahrzeug grün laden könnten [30]. Dies kann mit den erhobenen Daten bestätigt werden. Weiterhin impliziert die relativ hohe Preiselastizität der Nachfrage [28] eine sehr geringe mögliche Aufpreisspanne für grüne Lademöglichkeiten.

Ohne Speicher würde das System (Combined Corporate Carsharing) nach einem Zeitraum von 8,39 Jahren einen neutralen Kapitalwert aufweisen können (kritische Nutzungsdauer).

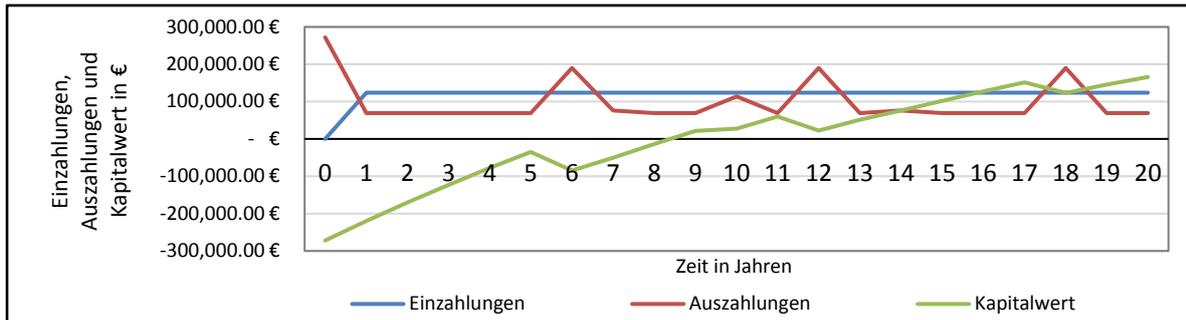


Abbildung 33: Verlauf der Ein- und Auszahlungen sowie des Kapitalwertes im Trendszenario bei Combined Corporate Carsharing und Kauf der Fahrzeuge ohne Einbezug eines Speichers.

Anmerkung: Speicher mit höchstem Kapitalwert und effizientester Ausnutzung – geringer Energiebezug aus dem Netz und nur geringe Überkapazitäten; das Berechnungsmodell wurde so angepasst, dass bei annähernd 100 % Autarkie der höchste Nutzen durch die Speicherinstallation entsteht. Bei realer Anwendung ist eine so hohe Autarkie aufgrund der hohen Volatilität des Energiebedarfs und der Erzeugung nicht ökonomisch und ökologisch sinnvoll umsetzbar.

Bei Einbeziehung eines Speichers, welcher das System zu annähernd 100 % regenerativer Energie versorgen kann (best case im idealisierten Modell), wäre die kritische Nutzungsdauer erst nach 28,96 Jahren erreicht. Dabei wurden jedoch noch keine Ersatzinvestitionen für Speicherkomponenten berücksichtigt.

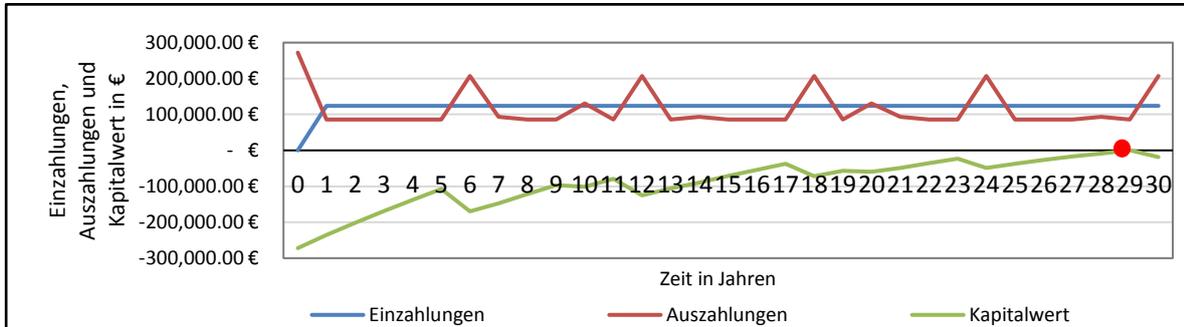


Abbildung 34: Verlauf der Ein- und Auszahlungen sowie des Kapitalwertes im Trendszenario bei Combined Corporate Carsharing und Kauf der Fahrzeuge unter Einbezug eines Speichers.

Es kann keine pauschale Aussage zur vorteilhaften Ausstattung eines Mobilitätskonzeptes getroffen werden. Diese hängt maßgeblich von den gestellten Anforderungen ab, welche mit möglichst geringem Aufwand (Nutzung von Synergien zum nachhaltigen Umgang mit Ressourcen) zu erfüllen sind.

5.4.7 Empfehlungen für die Ausgestaltung von Geschäftsmodellen

Mobilitätsdienstleistungen außerhalb der Fahrzeugbereitstellung. Die Auswertung der erfolgsversprechendsten Geschäftsmodelle sowie eine empirische Analyse vorhandener erfolgreicher Geschäftsmodelle haben gezeigt, dass die besten Aussichten für ein nachhaltig ökonomisch sinnvolles Geschäftsmodell bei Bündelung von Dienstleistungen bestehen.

Mobilitätsdienstleistungen mit Fahrzeugbereitstellung (Sharing). E-Mobility Sharing-Systeme sind nur bei einer hohen Auslastung sowie einer bestimmten Mindestgröße ökonomisch sinnvoll. Die Auslastung sollte 50 % nicht unterschreiten, die Mindestgröße hängt von der gewählten Infrastruktur und der gewünschten Servicequalität ab. So dürfte die Auslastung im Trendszenario bei Kauf der Fahrzeuge im Geschäftsmodell des Combined Corporate Carsharing nur um 12,7 % fallen, um weiterhin einen positiven Kapitalwert zu erhalten. Das würde bedeuten, dass ein Fahrzeug zwischen den Fahrten eine zusätzliche mittlere Standzeit von 5,73 Minuten haben dürfte.

Ladedienstleistungen. Eine mögliche erfolgsversprechende Kombination verschiedener positiv bewerteter Geschäftsmodelle ist das Angebot einer Wahlmöglichkeit bei der Fahrzeugladung. Zu Beginn des Ladevorgangs kann zwischen dem Standardenergiemix sowie einer Ökostromladung gewählt werden. Durch eine visuelle Darstellung der entstehenden Emissionen soll der Nutzer zur Wahl der ca. 10 % teureren [31] regenerativ erzeugten Energie animiert werden. Weiterhin soll die Möglichkeit von Schnellladungen geboten werden. Hierbei hilft der installierte Speicher, den Netzanschluss des Ladepunktes effizient zu nutzen (der Speicher trägt die zusätzliche zur Schnellladung benötigte Leistung und mindert damit die Netzanschlussgebühr (Installationskosten) sowie den Leistungspreis (Fixkosten)). Für die Schnellladeoption ist ein Aufschlag um 50 % gegenüber den Standardladekosten möglich [32].

Verbundene Lade- und Mobilitätsdienstleistung. Könnte das eben vorgestellte Ladekonzept mit dem eines Mobilitätsdienstleisters verbunden werden, würden die Ladesäulen zusätzlich genutzt werden.

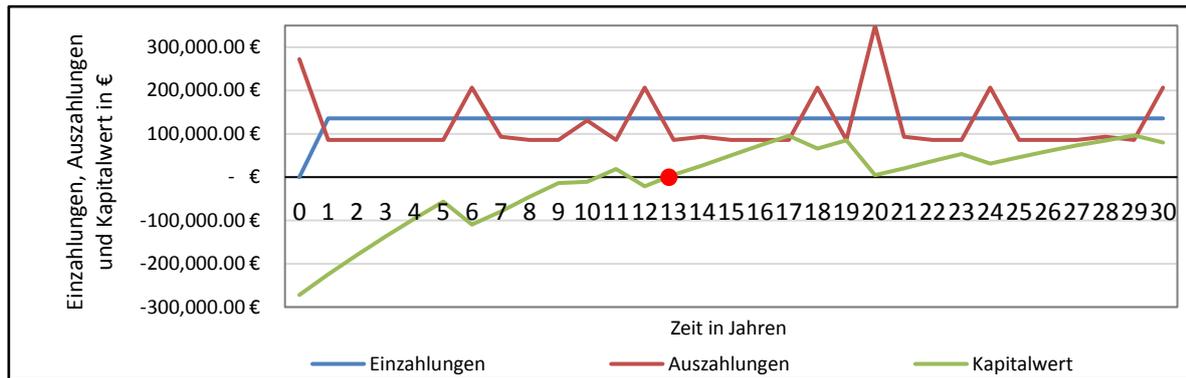


Abbildung 35: Verlauf der Ein- und Auszahlungen sowie des Kapitalwertes im Trendszenario bei Combined Corporate Carsharing und Kauf der Fahrzeuge unter Einbezug eines Speichers und Angebot der Fremdfahrzeugladung sowie Schnellladung.

Trotz der deutlichen Anhebung der Einzahlungen des kombinierten Geschäftsmodells können aber die hohen Auszahlungen für den Speicher (Ersatz nach 20 Betriebsjahren) nicht vollständig ausgeglichen werden. Die kritische Betriebszeit dieses kombinierten Geschäftsmodells ist erst nach 12,80 Jahren erreicht.

6 Diskussion und Ausblick

Das Projekt ECoMobility hat sich in drei Jahren Forschungsarbeit mit einigen der wesentlichen Fragen rund um das Thema der Mobilität der Zukunft beschäftigt. Diese interdisziplinären Fragestellungen wurden in verschiedene Detailfragestellungen aufgelöst, ohne die vorhandenen Kopplungen zu vernachlässigen.

So wurden zum einen für den dauerhaften und wartungsarmen Betrieb eines solchen multimodalen Mobilitätssystems wichtige Erkenntnisse gewonnen. Dazu zählt die Implementierung einer funktionalen WebApp, welche die Buchung von Fahrten in einem multimodalen Mobilitätsangebot beinhaltet, aber auch Rückgriff auf Fahrpläne des öffentlichen Personenverkehrs zulässt. Hinzu kommen ein nutzerfreundliches System zur Ladesäulensteuerung sowie ein schlüsselloses Zugangssystem zu den bereitgestellten Fahrzeugen durch Mitarbeiterausweise. Zusätzlich wurde durch das System die Fernwartung von Fahrzeugen und Ladesäulen gewährleistet.

Weiterhin konnten wichtige Ergebnisse für eine kontinuierliche Energieeinsparung beim Fahren mit Elektrofahrzeugen generiert werden. Neben einem energiebedarfsoptimierenden Routingalgorithmus zur Fahrzeugnavigation konnten Erkenntnisse zur Gestaltung von Anreizen zu sparsamer Fahrweise gesammelt und umgesetzt werden. Durch die Setzung entsprechender Anreize konnte eine durchschnittliche Energiebedarfsminderung von bis zu 7 % verzeichnet werden. Ferner wurden zentrale Elemente der Nutzerakzeptanz in der Interaktion mit dem Sharingsystem aufgezeigt, die auch auf andere Mensch-Technik-Interaktionen übertragen werden können. So kommt der Schaffung von Erfahrungswerten und der möglichst einfachen Gestaltung des Nutzungszugriffs eine bedeutende Rolle zu. Für die möglichst umweltfreundliche Ladung der Fahrzeuge wurde ein alternativer Optimierungsalgorithmus entwickelt, welcher den Anteil der erneuerbar erzeugten Energie an der Ladeenergie gegenüber etablierten Verfahren erhöht und damit einen weiteren Beitrag zum Umweltschutz leistet. Dabei wurden zusätzliche Aspekte, wie eine optimierte Speichernutzung und nachhaltige Betriebsweise der Speicher berücksichtigt.

Abschließend wurden Geschäftsmodelle analysiert und entwickelt, welche eine ökonomisch erfolgversprechend erscheinen und durch die Bereitstellung von vernetzter Elektromobilität als Sharing-Modell zur Verbreitung elektrisch getriebener Fahrzeuge und multimodaler Reiseplanung beitragen.

Das Projekt ECoMobility hat einige Fragestellungen zukünftiger Mobilitätslösungen erfolgreich beantwortet. Dabei konnten die detaillierten Aufgabengebiete des interdisziplinären Teams durch

die Umsetzung eines intermodalen Mobilitätskonzeptes am Beispiel der TU Chemnitz gut miteinander verknüpft werden. Durch diese Bündelung der Teilaufgabenstellung zu einem evaluierten innovativen Mobilitätssystem können die gewonnenen Erkenntnisse auf bestehende Mobilitätskonzepte und neue Herausforderungen angepasst werden. Das Projekt hat durch die vermehrte Nutzung von umweltfreundlicheren Mobilitätsangeboten einen aktiven Beitrag zum Umweltschutz geleistet. Es konnten beispielsweise 43 % des CO₂-Ausstoßes gegenüber Fahrten mit Benzinfahrzeugen vermieden werden. Außerdem wurde durch die Bereitstellung von Elektrofahrzeugen ein aktiver Beitrag zur Förderung der Akzeptanz der Elektromobilität geleistet. Die über die Projektlaufzeit gesammelten Erfahrungen, Ergebnisse und Ressourcen finden Anwendung in nachfolgenden Forschungsprojekten und werden außeruniversitär verwertet sowie publiziert.

Literaturverzeichnis

- [1] Tully, C.J., & Baier, D. (2006). *Mobiler Alltag. Mobilität zwischen Option und Zwang – vom Zusammenspiel biographischer Motive und sozialer Vorgaben*, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
- [2] Umweltbundesamt (2013). *Treibhausgasausstoß in Deutschland 2013: Vorläufige Ergebnisse aufgrund erster Berechnungen und Schätzungen des Umweltbundesamtes*, Dessau-Roßlau.
- [3] Born, B., Günther, M., Jähn, B., Müller, S., Scherer, S., Temmler, A., Teuscher, J., Götze, U., Heinkel, U., Krems, J.F., Schufft, W., & Wanielik, G. (2016). Connected Electromobility - Between CO2 optimized energy management, user-centered design and cost effectiveness. *Paper presented at 5. Conference on Future Automotive Technology, Munich, 03.-04.05.2016*. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1319481/1319481.pdf>
- [4] Günther, M., Temmler, A., & Teuscher, J. (2017). ECoMobility - Vernetzte (Elektro-)Mobilität an der TU Chemnitz. In A. Albert (Hrsg.), *Ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit an der TU Chemnitz - Posterband mit Beiträgen aus Lehre, Forschung, Administration und von universitären Interessengruppen*. 2. Aufl., S. 12-14, Chemnitz: Universitätsverlag der Technischen Universität Chemnitz. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-229689> ISBN: 978-3-96100-037-1
- [5] Langer, D., Bauer, S., Dettmann, A., & Kühnert, D. (2015). Nachwuchsforsergruppe fahrE: Konzepte für Multimodale Mikromobilität unter Nutzung lokaler regenerativer Energien, Abschlussbericht TU Chemnitz, Chemnitz, Germany.
- [6] Müller-Blumhagen, S., Günther, M., & Krems, J.F. (2017). *Driving Style Classification with Battery Electric Vehicles - Analysis of Driving Behavior and Intention*. Paper presented at ETC, European Transport Conference, Barcelona, Spain. ISSN 2313-1853
- [7] Müller-Blumhagen, S., Günther, M., & Krems, J.F. (2018). Using enriched OSM data for energy efficient routing. *SOTM: State of the Map*, Milan, Italy.
- [8] Mayring, P. (2014). *Qualitative content analysis: theoretical foundation, basic procedures and software solution*. Abgerufen von <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0168-ssor-395173>
- [9] Günther, M., Müller-Blumhagen, S., & Krems, J.F. (2017). The importance of acceptance for the usage of multimodal sharing systems in corporate transportation. *ETC: European Transport Conference*. Barcelona, Spain.
- [10] Günther, M., & Krems, J.F. (2018). How To Motivate Eco-driving With Battery Electric Vehicles? – The Positive Influence Of Consumption Related Feedback And Gamification. *ICAP: International Congress on Applied Psychology*, Montréal, Canada.
- [11] Rehme, M., Lindner R., & Götze, U. (2015). Perspektiven der Geschäftsmodelle der Fahrstrombereitstellung. in *Entscheidungen beim Übergang in die Elektromobilität*, Wiesbaden, Springer Fachmedien, pp. 409-428.

- [12] Schallmo, R. (2013). *Geschäftsmodelle erfolgreich entwickeln und implementieren*, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [13] Deinlein, J. (2003). *Tragfähigkeit von Geschäftsmodellen der Nex Economy*, Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag/GWF Fachverlag GmbH.
- [14] Bea, F.X., & Haas, J. (2016). *Strategisches Management*, Konstanz: UVK Verlagsgesellschaft mbH.
- [15] Umweltbundesamt (2018). *Entwicklung des CO₂-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2017 (in Gramm pro Kilowattstunde)*. Statista, 2018. Abgerufen von: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/>
- [16] ADAC (2018). *Wie rentabel sind Elektroautos?*, München: ADAC GmbH.
- [17] Forbes (2008). *Europäische Städte mit der niedrigsten Durchschnittsgeschwindigkeit im Straßenverkehr (Stand: 2008; in Kilometer pro Stunde)*,“ Statista - Das Statistik-Porta, 2008. Abgerufen von: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37200/umfrage/durchschnittsgeschwindigkeit-in-den-15-groessten-staedten-der-welt-2009/>
- [18] Rohkohl, S. (2017). *Radfahren fördert die Gesundheit*, DAK. Abgerufen von: <https://www.dak.de/dak/gesundheit/radfahren-1783876.html>.
- [19] Verkehrsverbund Rhein-Sieg GmbH (2014). *Nutzen des ÖPNV übersteigt die Kosten um das Vierfache*, Verkehrsverbund Rhein-Sieg GmbH. Abgerufen von: <https://www.vrsinfo.de/presse/presseartikel/presse/nutzen-des-oepnv-uebersteigt-die-kosten-um-das-vierfache.html>.
- [20] Vienna City Administration (2014). *STEP 2025 Thematic Concept - Urban Mobility Plan Vienna*, Wien: Urban Development Vienna.
- [21] EcoLibro GmbH (2016). *Mehr als die Hälfte der Bundesbürger bewegen sich zu wenig und sind damit erheblichen gesundheitlichen Risiken ausgesetzt*. Abgerufen von: <https://www.ecolibro.de/de/Themenfelder/Mobilitaet-und-Gesundheit>
- [22] Land Sachsen (2008). § 5 SächsRKG; *Sächsisches Gesetz über die Reisekostenvergütung der Beamten und Richter (Sächsisches Reisekostengesetz - SächsRKG)*.
- [23] Kessler, S. (2012). *Der Innovationsprozess der Zukunft: Mit Bewegung mehr Ideen-Kreativität fördern*, Bachelor + Master Publishing, Berlin.
- [24] Bundesministerium für Umwelt (2016). *Wirkung von E-Car Sharing Systemen auf Mobilität und Umwelt in Urbanen Räumen (WiMobil)*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin.
- [25] Lehmann, H. (2015). *Carsharing entlastet den Verkehr kaum*, *Tagesspiegel*, Berlin.
- [26] Stenger, R., & Nosbers, F. (2017). *Multimodalität: Nur Kooperationen führen zum Erfolg*, Bahn Fachverlag GmbH, Berlin.

- [27] Bastians, M. (2009). Preiselastizität im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) - Anwendungspotenziale und ihre Über; *Dissertation*, Kiel: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- [28] Gertz, C., Maaß, J. & Guimarães, T. (2015). Auswirkungen von steigenden Energiepreisen auf die Mobilität und Landnutzung in der Metropolregion Hamburg: Ergebnisse des Projektes €LAN – Energiepreisentwicklung und Landnutzung, In *Harburger Berichte zur Verkehrsplanung und Logistik*, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg. http://www.vsl.tu-harburg.de/eurolan2/files/BMBF-Fkz033L016A-C_Energiepreisentwicklung_Landnutzung.pdf
- [29] Behrend, M., & Meisel, F. (2017). *Sharing Economy im Kontext urbaner Mobilität*, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden.
- [30] Arnold, H., Kuhnert, F., Kurtz, R., & Bauer, W. (2010). *Elektromobilität - Herausforderungen für Industrie und öffentliche Hand*, Fraunhofer IAO. <https://wiki.iao.fraunhofer.de/images/studien/elektromobilitaet-herausforderungen-fuer-industrie-und-oeffentliche-hand.pdf>
- [31] Stromauskunft (2018). *Ökostrompreise in Deutschland*. Abgerufen von: <https://www.stromauskunft.de/oekostrom/oekostrom-preise/>.
- [32] E.ON Energie Deutschland GmbH (2018). *Überall aufladen*. Abgerufen von: <https://www.eon-drive.de/de/privatkunden/unterwegs.html>.