

Regionalisierung von E-Kfz-Ladestellen in Szenarien für den zukünftigen Ausbau in Deutschland

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

vorgelegt im Fachbereich Elektrotechnik/Informatik
der Universität Kassel
von Philip Gauglitz

Kassel, April 2023

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Kurt Rohrig
Zweitgutachterin: Prof. Dr.-Ing. Astrid Nieße

Datum der Disputation: 23. Oktober 2023

[diese Seite ist mit Absicht leer und kann für Notizen genutzt werden]

[diese Seite ist mit Absicht leer und kann für Notizen genutzt werden]

Allgemeine Angaben

Fachbereich, Fachgebiet und Promotionsfach

Fachbereich: Elektrotechnik/Informatik

Fachgebiet: Integrierte Energiesysteme

Promotionsfach: Umweltsystemtechnik

Betreuer

Prof. Dr.-Ing. Kurt Rohrig

Fachgebiet Integrierte Energiesysteme

Fachbereich Elektrotechnik/Informatik

Förderung, Anstellungen und Forschungsprojekt

Diese Arbeit wurde durch die Graduiertenförderung der Universität Kassel gefördert.

Ein Angestelltenverhältnis bestand während der Promotionslaufzeit bei der Universität Kassel, Fachgebiet Integrierte Energiesysteme und dem Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE. Bei beiden Arbeitgebern wurde insbesondere im Forschungsprojekt „Ladeinfrastruktur 2.0“ gearbeitet, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, FKZ 0350048, Laufzeit 01.11.2018 – 30.11.2023.

Es wurde am Promotionsprogramm des Fraunhofer IEE teilgenommen.

Stichworte zum Inhalt

Systemanalyse, Energiesystemtechnik, Regionalisierung, Szenarien, Ladestellen, Ladesäulen, Elektromobilität, Modellbildung, Sozioökonomik, Bevölkerungsentwicklung

Danksagung

Allen voran möchte ich Prof. Dr. Kurt Rohrig danken, der meine Promotion betreut hat. Angefangen bei der Themenfindung und -eingrenzung, über die fachliche Diskussion der Modelle und Validierungen bis hin zu Themen wie dem wissenschaftlichen Schreiben und Formalien im Promotionsverfahren hat er mein Promotionsvorhaben von Beginn an und bis zum Schluss in regelmäßigen Gesprächen begleitet und unterstützt. Er war immer ansprechbar, um Ideen zu diskutieren, verschiedene Varianten im Vorgehen abzuwägen und mit Rat zur Seite zu stehen. Vielen Dank!

Insbesondere möchte ich außerdem Prof. Dr. Astrid Nieße danken, die kurzfristig die Rolle der Zweitgutachterin übernommen hat. Dass sie in der Kürze der Zeit sehr tief und umfassend in die Promotionsinhalte eingestiegen ist und mir die Möglichkeit einer Vorstellung des Themas an der Universität Oldenburg gegeben hat, war mir eine große Hilfe bei der Finalisierung des Disputationsvortrags. Ich danke Prof. Dr. Clemens Hoffmann, in dessen Fachgebiet das Promotionsvorhaben beheimatet ist, und der mir insbesondere am Anfang wichtige Hinweise zur Themendefinition und Themenabgrenzung gegeben hat. Die Promotionskolloquien waren die Grundlage für den sehr wichtigen Austausch mit ihm und den anderen Promovend:innen. Zudem hat mir die Zeit bei ihm im Fachgebiet Integrierte Energiesystem die Möglichkeit gegeben, mich intensiv auf das Promotionsthema zu konzentrieren. Vor allem für die Strukturierung des Forschungsprojekts „Ladeinfrastruktur 2.0“ danke ich Prof. Dr. Martin Braun. Er hat mit viel Weitblick schon frühzeitig das Forschungsprojekt so gestaltet, dass hohe Synergien zwischen praktischer Projektarbeit und wissenschaftlicher Forschung hergestellt wurden. Damit hat er mehrere Promotionsvorhaben in dieser Form überhaupt ermöglicht. Ich danke Prof. Dr. Peter Zacharias für seine Rolle als Prüfer in der Disputation, seine Zeit und den spannenden Austausch! Den Kolleg:innen und Führungskräften am Fraunhofer IEE (Dr. Carsten Pape, David Geiger, Jan Ulffers und vielen Weiteren) danke ich für die gegebene Möglichkeit, an spannenden Forschungsprojekten mitwirken zu können, die gute Zusammenarbeit, den intensiven fachlichen Austausch, die Weiterbildung und allgemein den Rahmen der Beschäftigung. Ich danke der Graduiertenförderung der Universität Kassel, die mir mit dem Promotions-Abschluss-Stipendium ermöglicht hat, mich nach der inhaltlichen Arbeit intensiv der schriftlichen Ausarbeitung zu widmen.

Ein großes Dankeschön gilt außerdem Dr. Christian Spalthoff, Dr. Steffen Gauglitz und Theresa Rohmund für das Probelesen der Arbeit. Danke für die vielen wertvollen Hinweise, an welchen Stellen es noch Überarbeitungsbedarf in den Formulierungen gab!

Inhaltsverzeichnis

Allgemeine Angaben.....	4
Danksagung.....	5
Inhaltsverzeichnis.....	6
Kurzzusammenfassung.....	8
Abstract.....	9
1 Einleitung.....	11
1.1 Motivation und Vision.....	11
1.2 Fragestellungen und Zielsetzung.....	13
1.3 Aufbau der vorliegenden Arbeit.....	14
1.4 Untersuchungsgegenstand.....	15
1.4.1 Abgrenzung des Promotionsvorhabens vom Projekt „LI 2.0“.....	16
1.5 Vorgehensweise.....	17
1.5.1 Wissenschaftliche Veröffentlichungen.....	17
1.5.2 Validierung.....	17
2 Stand der Forschung.....	20
2.1 Regionalisierung allgemein.....	20
2.2 Regionalisierung und Ausbaupfade Elektromobilität.....	22
2.3 Herausforderungen, Übertragbarkeit und Anwendungen.....	25
3 Methodik.....	28
3.1 Gemeindeebene: Demografischer Wandel.....	28
3.1.1 Bestehende Daten und Modelle.....	29
3.1.2 Jährliche Modellierung und Sonderfall kleine Gemeinden.....	30
3.2 Gemeindeebene: Fahrzeug- und Ladestellenanzahlen.....	31
3.2.1 Eingangsdaten und gewünschte Ausgangsdaten.....	32
3.2.2 Faktorbildung und Berechnungsschritte.....	33
3.3 Detailregionalisierung: Bevölkerungsstruktur.....	35
3.3.1 Synthetische Bevölkerung eines Straßenabschnittes.....	37
3.3.2 Demografischer Wandel und Verortung der Bevölkerung.....	42
3.3.3 Validierung der Bevölkerungsverteilung.....	44
3.4 Detailregionalisierung: Heimladen.....	46
3.4.1 Auswahl der Merkmale für die Verteilung.....	47
3.4.2 Generierung der räumlichen Verteilung.....	48

3.4.3	Validierung der Elektrofahrzeug-Eignung	53
3.5	Detailregionalisierung: (halb-) öffentliches Laden	57
3.5.1	Modelleingangsgrößen: Bedarfe nach Ladestellen	58
3.5.2	Bewertung der Bedarfe	60
3.5.3	Modelleingangsgrößen: Parkflächenpotentiale	60
3.5.4	Rasterrechnung und räumliche Verteilung	64
3.5.5	Validierung der Ladebedarfe.....	67
3.6	Szenarienbildung und Schnittstelle	70
3.6.1	Szenarienbildung.....	70
3.6.2	Technische Umsetzung der Schnittstelle.....	74
3.7	Zusammenfassung der Methodik.....	76
4	Modellergebnisse	80
4.1	Gemeindeebene: Demografischer Wandel.....	80
4.2	Gemeindeebene: Fahrzeug- und Ladestellenanzahlen.....	84
4.3	Detailregionalisierung: Bevölkerungsstruktur	85
4.4	Detailregionalisierung: Heimpladen	90
4.5	Detailregionalisierung: (halb-) öffentliches Laden.....	98
4.6	Schnittstelle und Szenarienbildung	110
4.7	Zusammenfassung der Modellergebnisse.....	112
5	Fazit und Schlussfolgerungen.....	113
5.1	Zusammenfassung	113
5.2	Diskussion der Ergebnisse	117
5.2.1	Einordnung in den Stand der Forschung.....	117
5.2.2	Aspekte des Modellaufbaus.....	119
5.2.3	Abgleich mit den forschungsleitenden Fragestellungen.....	120
5.2.4	Anwendungsbereiche und Übertragbarkeiten	121
5.3	Ausblick.....	123
5.3.1	Umgesetzte Arbeiten.....	124
5.3.2	Mögliche Erweiterungen in der Modellstruktur	124
5.3.3	Interdisziplinäre Modellstruktur-Ausweitung	127
	Literatur	129
	Abbildungsverzeichnis	143
	Tabellenverzeichnis	144
	Abkürzungsverzeichnis.....	145
	Python-Bibliotheken	146

Kurzzusammenfassung

Ein wesentlicher Baustein zur Senkung der CO₂-Emissionen im Verkehrssektor ist die Elektrifizierung des Individualverkehrs, wobei die schnell wachsende Ladeinfrastruktur Auswirkungen auf das Stromnetz hat. Netzberechnungen erfordern die räumliche Verortung von zukünftigen Ladestellen. Die vorliegende Arbeit modelliert dafür Heimpladestellen und öffentlich zugängliche Ladestellen holistisch und punktgenau, und ist für alle Gemeinden in Deutschland anwendbar. Zunächst wird die Anzahl an Elektrofahrzeugen und Ladestellen je Gemeinde bestimmt. Hierbei werden unter anderem der demografische Wandel und Pendlerstatistiken berücksichtigt. Fokus der Arbeit ist die daran anschließende Detailregionalisierung, die am Beispiel Hamburg vorgestellt wird. Das Heimplade-Modell basiert auf einer synthetischen Bevölkerung auf Haushaltsebene unter Einbeziehung sozio-ökonomischer Aspekte. Für öffentlich zugängliche Ladestellen werden Ladebedarfe, unter anderem bei Points of Interest, den Parkplatzpotentialen gegenübergestellt. Modellumfang und Detailtiefe bieten gegenüber bisherigen Verfahren validierte Vorteile. Beispielsweise werden Minimalwerte öffentlicher Ladebedarfe realistischer abgebildet als in einem verglichenen KI-Verfahren, und die haushaltsscharfe Zuordnung zeigt eine engere Korrelation zu Zensusdaten als straßenzugbasierte Ansätze. Für die praktische Anwendung in der Netzplanung ist eine Schnittstelle zu Ladezeitreihen und Netzberechnungen ausgearbeitet. Die so zugänglichen Modellergebnisse eignen sich für die recheneffiziente Abbildung einer großen Szenarienbandbreite, sowie für die probabilistische Berechnung eines konsekutiven Netzausbaus. Damit wurde ein sehr wertvolles Werkzeug geschaffen, um die dringend notwendige Umsetzung der Energiewende zu unterstützen.

Abstract

A key component in reducing CO₂ emissions in the transport sector is the electrification of individual transport, with a rapidly growing charging infrastructure having implications for the power grid. Grid calculations need to include the spatial location of future charging points. This work models home charging stations and publicly accessible charging stations holistically and with pinpoint accuracy and is applicable to all municipalities in Germany. First, the number of electric vehicles and charging stations per municipality is determined. Among other things, demographic change and commuter statistics are taken into account. What follows is the focus of the work: detailed regionalization, which is presented using the example of the city of Hamburg. The home charging model is based on a synthetic population on the household level including socio-economic aspects. Demand for publicly accessible charging points, for example at points of interest, is compared with parking space potentials. The model's scope and level of detail offer validated advantages over previous methods. For example, minimum values for public parking demands are mapped more realistically than in an AI method used for comparison, and household-specific mapping shows a closer correlation to census data than an approach based on cumulated data at the level of street sections. For practical application in grid planning, an interface to incorporate demand time series and grid calculations has been worked out. The results accessible in this way are suitable for the computationally efficient representation of a wide range of scenarios, as well as for the probabilistic calculation of a consecutive grid expansion. Thus, a very valuable tool has been created to support the urgently needed transition in the energy sector.

1 Einleitung

In der vorliegenden Arbeit werden Methoden entwickelt, mit denen Ladestellen regionalisiert werden können, sowohl Heimpladestellen als auch Ladestellen im öffentlichen und halböffentlichen Bereich. Teil der Arbeit ist dabei die Untersuchung, inwieweit sozioökonomische Daten wie Einkommensverhältnisse und Wohngegebenheiten zur Regionalisierung genutzt werden können. Diese Arbeit zeichnet sich insbesondere durch die Ladestellentyp-übergreifende Betrachtung, die Berücksichtigung des demografischen Wandels, die hohe Auflösung der erzeugten Ladestellenverteilungen und der möglichen Anbindung an Netzberechnungen über eine entwickelte Schnittstelle aus.

In den folgenden Unterkapiteln wird zunächst aus der Motivation für das Forschungsthema eine Vision für die vorliegende Arbeit abgeleitet (Kapitel 1.1). Aufbauend werden die Fragestellungen und die Zielsetzung erarbeitet (Kapitel 1.2). Anschließend werden der Aufbau der Arbeit erklärt (Kapitel 1.3), der Untersuchungsgegenstand festgelegt (Kapitel 1.4), und die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit beschrieben (Kapitel 1.5).

Kapitelgliederung

1.1 Motivation und Vision

Der Klimawandel beeinflusst das Ökosystem und die menschliche Gesellschaft und verursacht erhebliche Risiken [1]. Die beobachteten Einflüsse betreffen zahlreiche Bereiche des menschlichen Lebens: Nahrungsmittelproduktion, Wasserversorgung, Infektionskrankheiten, Infrastrukturschäden, direkte gesundheitliche Schäden und Umsiedlung und sind dabei überwiegend nachteilig [1]. Die Reduzierung von Treibhausgasemissionen ist damit eine der zentralen Aufgaben der gesamten Weltbevölkerung. Kohlendioxid (CO₂) „macht den Großteil des vom Menschen zusätzlich verursachten Treibhauseffektes aus“ [2], und entsteht in verschiedenen Sektoren, unter anderem im Verkehrsbereich. Ein wesentlicher Baustein zur Senkung der CO₂-Emissionen im Verkehrsbereich ist die deutlich gesteigerte Elektrifizierung dieses Sektors. Zur Elektromobilität gehört insbesondere auch die Ladeinfrastruktur, die als neuer und schnell wachsender elektrischer Verbraucher Auswirkungen auf das Stromnetz hat. Bei einem international angenommenen erheblichen Markthochlauf von Elektrofahrzeugen und auch einer nationalen Zielsetzung, einen Markt mit „Strahlkraft“ zu schaffen, ist von erheblichen Ladeleistungen auszugehen, deren Auswirkungen auf das Netz deutlich sein werden [3; 4], und – ohne entsprechende Gegenmaßnahmen – beispielsweise zu Trafoüberlastungen oder Spannungsabfällen im Verteilnetz führen könnten. Dabei komme es insbesondere „auf die lokalen Gegebenheiten vor

Hintergrund

Ort an.“, wobei es in „abgelegenen Ortsteilen mit beispielsweise nur einer Verteilerstation“ bei einem entsprechenden Ausbau an Wallboxen knapp werden könne, meint Sebastian Exner vom Interessenverband der Netzbetreiber in Rheinland-Pfalz und Hessen [5]. Auch aus Sicht der Anwender:innen ist das Thema Ladeinfrastruktur zentral für den möglichen Umstieg auf Elektromobilität. Dies verdeutlicht eine Umfrage des BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (im Folgenden: BDEW), bei der sich die fehlende öffentliche Ladeinfrastruktur unter den Top drei der Gründe befindet, sich gegen die Anschaffung eines Elektrofahrzeugs zu entscheiden, wenn auch mit abnehmender Tendenz der Nennung von 2018 zu 2019 [6].

Regionalisierung

Die Netzberechnungen erfordern damit also Szenarien, die die räumliche Verortung von möglichen zukünftigen Erzeugern und Verbrauchern aufzeigen. Im Rahmen dieser Arbeit sollen Methoden untersucht, entwickelt und bewertet werden, mit denen eine räumliche Verortung möglich ist. Grundlage für die Ermittlung einer solchen räumlichen Verteilung ist dabei zunächst die Bestimmung der Gesamtanzahl von Elektrofahrzeugen in einem festgelegten Szenarijahren. Diese Gesamtanzahl wird an dieser Stelle getrennt von der Frage der räumlichen Verortung und im Rahmen der Promotion als Annahme bzw. Eingangsgröße verstanden. In dieser Arbeit wird deswegen die *Regionalisierung* vorher festgelegter Ladeleistungen oder Anzahlen von Ladepunkten adressiert.

Einführung zum
Stand der Forschung

Bisherige Studien regionalisieren Ladeleistungen von Elektrofahrzeugen teilweise anhand einfacher statistischer Zuordnungen, basierend beispielsweise auf Einwohner- und Pendlerzahlen oder Gebäudebeständen [7; 8]. Andere Untersuchungen legen den Fokus auf die Lösung von Optimierungsproblemen bezogen auf die Abdeckung von Verkehrsaufkommen, allerdings meist nur für einen bestimmten Typ an Lademöglichkeiten (vgl. [9; 10]). Es gibt Ansätze zur Nutzung von Marktdaten wie beispielsweise der Kaufkraft in bestimmten Straßenzügen [11]. Diese berücksichtigen zunächst die aktuelle Situation (bspw. [12]), während für die Entwicklung von Netzstudien die Erstellung eines zukünftigen Szenarios im Vordergrund steht. Der Stand der Forschung wird umfangreich in Kapitel 2 dargestellt, weitere Übersichten dazu finden sich zudem in zwei Veröffentlichungen des Autors [13; 14] und in einer umfangreichen Übersicht von PAGANY ET AL., bei der bestehende Modelle nach Typen klassifiziert werden [15].

Die bisherigen Studien helfen damit nur bedingt weiter, Szenarien von Ladestellenverteilungen typenübergreifend, ortsübergreifend und räumlich präzise zu modellieren. Die vorliegende Arbeit setzt an dieser Stelle an. Die übergeordnete Vision dieser Arbeit lautet:

Es wird ein Werkzeug geschaffen zur Regionalisierungen von Ladestellen für Elektrofahrzeuge. Dies schafft ein Verständnis für die Herausforderungen, die auf den Netzausbau zukommen. Dadurch wird der aus Klimaschutzgründen dringend benötigte Umbau des Energiesystems unterstützt. Eine allgemein in Deutschland anwendbare Methodik bei gleichzeitig detaillierter Modellierung verschiedener Aspekte erlaubt dabei eine hochwertige Szenarienerstellung. Diese deckt Hürden beim Ausbau der Elektromobilität frühzeitig auf, verhindert über den substanziellen Erkenntnisgewinn eine Netzüberlastung und stellt damit einen wichtigen Beitrag zur Beschleunigung der Energiewende dar.

Vision

Vision

1.2 Fragestellungen und Zielsetzung

Aus der vorhergenannten Vision lässt sich das Ziel der Arbeit ableiten: ein Modell für die Regionalisierung von Elektrofahrzeugen und deren Ladestellen zu entwickeln, das sich für die Anwendung in Netzberechnungen eignet. Zum Ziel der Arbeit gehört es, eine Übersicht der möglichen Verfahren zur Regionalisierung von Ladeleistungen zu schaffen und deren Einsatzgebiete und Einschränkungen aufzuzeigen. Zudem soll gezeigt werden, inwieweit heutige sozioökonomische Daten genutzt werden können, um in Verbindung mit demografischen Modellen die Erstellung von Szenarien für Ladestellen unterstützen zu können.

Die forschungsleitenden Fragestellungen lauten damit:

*Welche Vorteile bietet eine zweistufige Regionalisierung unter Berücksichtigung von sozioökonomischen Daten und Points of Interest für die räumliche Abbildung (Regionalisierung) zukünftiger Elektrofahrzeug-Ladestellen?
Kann ein ausreichender Detaillierungsgrad für eine punktgenaue Verortung erreicht werden, die einen Mehrwert für die Netzberechnung bietet?
Ist die interdependente Regionalisierung unterschiedlicher Ladestellentypen geeignet für die Modellierung einer großen Bandbreite von Szenarien?*

Forschungsleitende Fragestellungen

Forschungsleitende
Fragestellung

1.3 Aufbau der vorliegenden Arbeit

Aufbau der
einleitenden Kapitel

Im folgenden Kapitel 1.4 wird der Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit dargestellt. Im Kapitel 1.5 wird die Vorgehensweise vorgestellt, wie die oben genannten wissenschaftlichen Fragestellungen beantwortet werden. Dazu gehört die Publikation wissenschaftlicher Artikel (Kapitel 1.5.1) und das Konzept der Validierung (Kapitel 1.5.2).

Aufbau der Kapitel
zum Stand der
Forschung

In Kapitel 2 wird der Stand der Forschung dokumentiert, wobei auf Regionalisierungsmodelle im Allgemeinen (Kapitel 2.1) und die Regionalisierung und Ausbaupfade von Elektrofahrzeugen und Ladestellen im Speziellen (Kapitel 2.2) eingegangen wird. Anschließend werden die Herausforderungen, die Übertragbarkeiten zwischen Regionalisierungen verschiedener Technologien und die Anwendungen solcher Modelle beleuchtet (Kapitel 2.3).

Aufbau der
Methodik

Darauf aufbauend wird die entwickelte Methodik in Kapitel 3 vorgestellt, wobei auf die entsprechenden Modellelemente auf der Gemeindeebene (Demografischer Wandel in Kapitel 3.1 und die Modellierung von Fahrzeug- und Ladestellenanzahlen in Kapitel 3.2) und auf die Modellelemente der Detailregionalisierung eingegangen wird. Die Detailregionalisierung bildet dabei den Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeit und umfasst die feinräumige Bevölkerungsstruktur (Kapitel 3.3), die Methodik für die Modellierung der Heimpladestellen (Kapitel 3.4) und der Ladestellen im öffentlichen und halböffentlichen Bereich (Kapitel 3.5). Abschließend wird dargestellt, mit welchen Methoden aus den Regionalisierungen Szenarien gebildet werden können (Kapitel 3.6.1) und wie die technische (Daten-) Schnittstelle zu anderen wissenschaftlichen Arbeiten aufgebaut ist (Kapitel 3.6.2). Eine Zusammenfassung der Methodik erfolgt in Kapitel 3.7.

Aufbau der
Modellergebnisse

Im Kapitel 4 werden die Modellergebnisse am Beispiel der Anwendungsregion Hamburg dargestellt. Die entsprechenden Kapitel der zweiten Gliederungsebene sind dabei analog zum Methodik-Kapitel aufgebaut und stellen dementsprechend die Modellergebnisse für den demografischen Wandel (Kapitel 4.1), die Fahrzeug- und Ladestellenanzahlen (4.2), die Bevölkerungsstruktur (4.3), die Heimpladestellen (4.4), die öffentlichen und halböffentlichen Ladestellen (4.5) und die Ergebnisse der Schnittstellen- und Szenarienbildung (4.6) vor.

Aufbau der
abschließenden
Kapitel

Kapitel 5 enthält eine Zusammenfassung der Arbeit (Kapitel 5.1) und eine Diskussion (Kapitel 5.2); darauf aufbauend wird ein Ausblick (Kapitel 5.3) möglicher weiterführender Forschungen gegeben.

Es folgen die Verzeichnisse für die zitierte Literatur, die Abbildungen, die Tabellen, die genutzten Abkürzungen und die Auflistung der genutzten Python-Bibliotheken.

1.4 Untersuchungsgegenstand

Entsprechend der Zielsetzung der Arbeit (siehe Kapitel 1.2) wird ein Modell für die Regionalisierung von Elektrofahrzeugen und deren Ladestellen entwickelt, dessen Ergebnisse sich für die Anwendung in Netzberechnungen eignen.

Es wird der mittel- bis langfristige Ausbau der Ladestellen für Elektrofahrzeuge untersucht. Die Regionalisierungsmethoden sollen dafür prinzipiell für alle Gemeinden in Deutschland nutzbar sein. Untersuchungsgegenstand sind Ladestellen für elektrische Personenkraftwagen (im Folgenden: Pkw), wobei ausdrücklich Heimpladestellen und öffentliche bzw. halböffentliche Ladestellen betrachtet werden. Als halböffentliche Ladestellen werden Ladestellen verstanden, die sich auf nichtöffentlichen Flächen befinden, aber öffentlich zugänglich sind, wie beispielsweise Ladestellen auf Supermarktparkplätzen. Nicht zum halböffentlichen Laden zählen Ladestellen nur für ausgewählte Personengruppen, wie beispielsweise Ladestellen beim Arbeitgeber, die ausschließlich Mitarbeiter:innen zur Verfügung stehen. Das Modell soll sich durch die folgenden Merkmale auszeichnen:

- Punktgenaue Verortung der Ladestellen (im Gegensatz zu einer indirekten, flächenbezogenen Raumgröße)
- Darstellung eines plausiblen Ausbaus (im Gegensatz zu einer mathematischen Optimierung anhand einer Optimierungsgröße)
- Möglichkeit der Variation von verschiedenen Szenarienpfaden
- Abbildung und Kombinationsmöglichkeit verschiedener Ladestellentypen. In der vorliegenden Arbeit werden dabei behandelt:
 - Ladestellen zu Hause (Heimpladestellen)
 - Öffentliche und halböffentliche Ladestellen
- Entwicklung einer Methodik mit Anwendungsmöglichkeit in ganz Deutschland
- Berücksichtigung von sozioökonomischen Faktoren einschließlich des demografischen Wandels

Als Ergebnis des Promotionsvorhabens wird das geschaffene Modell an sich verstanden. Das Ergebnis ist damit die Methodik und das so geschaffene Werkzeug, und geht über Modellergebnisse – die erstellten Datensätze – hinaus.

1.4.1 Abgrenzung des Promotionsvorhabens vom Projekt „LI 2.0“

Die vorliegende Arbeit hat einen hohen Praxisbezug und steht im Kontext weiterer Themen und Forschungsvorhaben. Dazu gehört insbesondere das Forschungsprojekt „Ladeinfrastruktur 2.0“, abgekürzt „LI 2.0“ unter der Leitung des Fraunhofer-Instituts für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE (im Folgenden: Fraunhofer IEE), gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (FKZ 0350048, Laufzeit 01.11.2018 – 30.11.2023), in dessen Rahmen das Promotionsvorhaben entstanden ist. Zu dem Forschungsprojekt gehört auch eine spezifische Untersuchung für die Stadt Hamburg, für die das Fraunhofer IEE von der Stadt Hamburg beauftragt wurde.

Inhaltliche
Abgrenzung zum
Forschungsprojekt

Diese Arbeit umfasst Methoden zur räumlichen Verortung. Die Frage nach dem gesamten Ausbau, also der Anzahl an Elektrofahrzeugen in einem Szenarienjahr, wird hier als Eingangsgröße verstanden, und wird nicht im Rahmen dieser Arbeit ermittelt. Dieser wird vielmehr sowohl im oben genannten Projekt „Ladeinfrastruktur 2.0“, als auch in anderen Projekten wie dem Netzentwicklungsplan oder Verteilnetzstudien in einem Projektkonsortium auch in Bezug auf politische Zielsetzungen diskutiert und festgelegt (vgl. [7; 16]). Ebenfalls nicht Teil der vorliegenden Arbeit ist die Regionalisierung anderer Energieverbraucher oder Energieerzeuger. Auch Ladestellen in den Bereichen Laden beim Arbeitgeber, zentrale Ladeinfrastruktur mit höherer Ladeleistung und Ladezeitreihen für Ladestellen sind zwar Gegenstand des breiteren Forschungsprojektes, in dessen Rahmen diese Arbeit erstellt wurde, und wurden dort vom Autor und/oder Kollegen modelliert, werden aber in der vorliegenden Arbeit nicht fokussiert betrachtet, um Raum zu geben für eine tiefgreifende und fokussierte wissenschaftliche Bearbeitung des Ladens zu Hause und des (halb-) öffentlichen Ladens.

Kooperation im
Forschungsprojekt

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Ladeinfrastruktur 2.0“ besteht ein intensiver Austausch mit den Projektpartnern, insbesondere den beteiligten Netzbetreibern (Verbundpartner: Thüga Aktiengesellschaft & Stromnetze Hamburg GmbH; assoziierter Partner: Netze BW GmbH) [17; 18]. Die Zusammenarbeit ermöglichte – sowohl allgemein im Projektkontext, als auch bezogen auf die Themen der Dissertation – die Validierung über Experteneinschätzungen (bspw. [19]) sowie über Daten- und Modellvergleiche der bestehenden Berechnungen der Netzbetreiber oder deren Tochterunternehmen (Vergleichsmodell siehe [20; 21]; Publikation mit Modellvergleich siehe [14]).

1.5 Vorgehensweise

Zur Erreichung der Ziele wurde zunächst der Stand der Forschung analysiert (Kapitel 2). Mögliche Übertragungen, Grundlagen und schon bestehende Erkenntnisse wurden genutzt, um Eingangsdaten zu identifizieren und eine Modellstruktur zu entwickeln. Anschließend wurden die einzelnen Modellelemente entwickelt, deren Methodik in den Unterkapiteln von Kapitel 3 dokumentiert werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes „Ladeinfrastruktur 2.0“ wurde dieses Modell für verschiedene Gemeinden in Deutschland angewandt, im Rahmen dieser Dissertation werden die Regionalisierungen anhand des Beispiels für Hamburg im Kapitel 4 dargestellt.

Allgemeine
Vorgehensweise

Die inhaltlichen Promotionsziele galt es unter Berücksichtigung von Randbedingungen wie der möglichen Promotionszeit zu erreichen. Hierfür wird das Promotionsvorhaben als Projekt aufgefasst und unter Zuhilfenahme von klassischen Projektmanagement-Methoden bearbeitet.

Projektmanagement
zur Erreichung der
Promotionsziele

Zentrale Teile des Promotionsvorhabens sind die wissenschaftlichen Publikationen und die Validierung der Methoden, siehe folgende Kapitel 1.5.1 und 1.5.2.

Kapitelstruktur

1.5.1 Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Als essentieller Teil des Promotionsvorhabens wurden die erarbeiteten Inhalte in zwei Journal-Veröffentlichungen [13; 14] publiziert, auf deren Inhalte in den jeweiligen Methodik-Kapiteln (siehe Unterkapitel von Kapitel 3) und Modellergebnis-Kapiteln (siehe Unterkapitel von Kapitel 4) eingegangen wird. Zudem wurden die Inhalte auf mehreren Konferenzen und Workshops vorgestellt [22–24]. Der Diskurs mit den Gutachter:innen und Teilnehmer:innen ist ein wichtiger Baustein zur Überprüfung der Methoden. Ein weiterer Teil der wissenschaftlichen Arbeit ist die Betreuung von Abschlussarbeiten. Dabei erfolgte die fachliche Betreuung als externer Betreuer am Fraunhofer IEE, eine Betreuung mit Notenvergaberecht im Sinne der jeweiligen Uni-Regularien fand nicht statt. Eine Abschlussarbeit betrifft Inhalte der hier beschriebenen Methodik, wird sie sowohl eingangs der entsprechenden Kapitel als auch im Text aufgegriffen.

1.5.2 Validierung

Wichtiger Teil der Vorgehensweise ist die Validierung des Modells. Der Begriff der Validierung oder Validation wird in verschiedenen Disziplinen sehr unterschiedlich genutzt (vergleiche die Nutzung in [25–27]), weswegen zunächst beschrieben wird, was unter einer Validierung in dem vorliegenden Kontext verstanden wird. Eine gut übertragbare Definition findet sich bei GERBERICH: „Validierung [...] zielt auf die Überprüfung der Eignung des Modells in Bezug auf die

Definitionen
Validierung

Aufgabenstellung und die hinreichende Abbildung des untersuchten Unternehmensbereichs.“ [28], wobei man hier den Unternehmensbereich allgemeiner als Themenfeld fassen kann. Sie ähnelt anderen Definitionen der Validierung, wie der von BERTRAM [25] oder der in der Norm ISO 9000:2015 [29]. Zu unterscheiden ist die Validierung von anderen Begriffen, die sich auf die konkrete Überprüfung von Ergebnissen und Werten beziehen, wie der Plausibilisierung [30] und der Verifizierung [29]. Eine Validierung anhand datengetriebener Verfahren ist zwar möglich (vergleiche [26]), dies ist jedoch für die oben genannte, etwas allgemeinere Definition der Validierung nicht zwingend.

Gedanken-
experiment
datengetriebene
Validierung

Als Gedankenexperiment für eine Validierung von Ladestellenverteilungen anhand konkreter Datensätze sei folgendes Beispiel genannt: Für Bundesland A soll eine Verteilung generiert werden und Bundesland B erfüllt die folgenden drei Voraussetzungen: Es wäre erstens strukturell vergleichbar aufgebaut; es hätte zweitens eine deutlich weiter ausgebauten Ladestellenverteilung und es besäße drittens eine gleiche Datenverfügbarkeit für die Modellierung. Würde man für B einen analogen Ausbau modellieren, wie er tatsächlich stattgefunden hat, könnte man davon ausgehen, dass das Modell auch für A valide Ergebnisse generiert. Auch hier wäre nicht Ziel des Modells, dass exakt die realen Koordinaten der Ladestellen ermittelt werden, sondern eine ähnliche Verteilung im Sinne der Aufgabenstellung erstellt wird.

Validierung in der
Szenarien-
modellierung

Bei einer potentiell gewünschten Umsetzung dieses Gedankenexperiments gibt es nun zwei Schwierigkeiten: Zum einen gibt es weder ein anderes Bundesland, noch einen anderen Staat, der sowohl einen weit fortgeschrittenen Ausbau von Ladeinfrastruktur besitzt, als auch eine gleiche Struktur aufweist, zumal diese ja auch rein praktisch in einem adaptierbaren Datensatz abgebildet sein müsste. Darüber hinaus ließe diese Vorgehensweise aber auch einen ganz anders gelagerten Aspekt der Szenarienbildung außer Acht: Die Vision für die vorliegende Arbeit beinhaltet ja die Schaffung eines Werkzeugs, um besser zu verstehen, welche Herausforderungen auf den Netzausbau zukommen können. Eine reine Fokussierung auf das Übereinstimmen eines Zahlenergebnisses wird diesem nicht gerecht. Eine Komplexitätserhöhung ist damit immer gegen eine mögliche Nachvollziehbarkeit von Einflüssen abzuwägen. Zusammenfassend und vereinfacht ausgedrückt: Eine nachvollziehbare Methodik, die Herausforderungen im Netzbereich abbildet und Schlussfolgerungen zulässt, ist einem Blackbox-Modell vorzuziehen, das perfekt „richtige“ Ergebnisse liefert (zumal die Festlegung, welche Verteilungen „richtig“ sind, nicht trivial ist, s.o.).

Vielmehr sind die folgenden Aspekte relevant, um zu beurteilen, ob das Modell valide ist:

- Werden die richtigen Einflussgrößen abgebildet?
- Werden die Einflussgrößen von ihrer Wirkung plausibel abgebildet?
- Ist die Methodik passend für die vorliegende Fragestellung?
- Ist die Methodik transparent?
- Hilft das Modell beim Erkenntnisgewinn?

Da es keine einzelne Messgröße gibt, um diese Aspekte zu prüfen, stützt sich die Validierung der Arbeit auf mehrere Säulen. Dabei werden insbesondere einzelne Schritte der Methodik validiert, aber auch eine Plausibilisierung der Ergebnisse verfolgt:

Säulen der
Validierung
in dieser Arbeit

- Veröffentlichung in Fachjournals und Diskurs mit den Gutachter:innen zur Validierung, ob die Struktur der Methodik an sich ein geeignetes Mittel für die vorliegende Fragestellung ist
- Korrelationsvergleiche von Modellzwischenergebnissen mit alternativen Modellen/Daten mit Hypothesenbildung und -prüfung (Kapitel 3.3.3, 3.4.3 und 3.5.5)
- Workshops und Austausch mit Industriepartnern zur Validierung der Eingangsgrößen, abgebildeten Kriterien und genutzten Statistiken, Diskussion mit Expertenrunden zur Plausibilisierung der Modellergebnisse

Die letztgenannten Gespräche dienen dabei nicht nur der Validierung des Modells, sondern adressieren auch im Kern die Vision der Arbeit, nämlich im Gespräch mit mehreren beteiligten Parteien einen Erkenntnisgewinn zu erzeugen über mögliche Auswirkungen des Ausbaus der Ladeinfrastruktur.

2 Stand der Forschung

Für die Erstellung von Energieversorgungsszenarien im Allgemeinen und für Netzstudien im Speziellen wurden in der bestehenden Forschung zahlreiche Methoden erarbeitet und verfeinert, um sowohl elektrische Erzeuger wie Erneuerbare Energieanlagen als auch elektrische Verbraucher wie Haushaltsgeräte, Wärmepumpen und Ladestellen für Elektrofahrzeuge zu regionalisieren. Aufgrund der wechselseitigen Relevanz der Themen wird der Stand der Forschung hier weit gefasst. Daher werden nicht nur die Regionalisierungen von Ladestellen von Elektrofahrzeugen betrachtet, sondern auch Methoden zur Regionalisierung von anderen elektrischen Verbrauchern und Erneuerbaren Energien, sowie übergreifende Studien zu Ausbaupfaden.

Im Folgenden werden zunächst Studien und Modelle zu allgemeinen Regionalisierungen und Ausbaupfaden betrachtet. Dabei wird der Fokus darauf gelegt, einen Einblick in verschiedenartige Methoden zu geben. Anschließend werden Regionalisierungen von Elektrofahrzeugen und Ladestellen im Speziellen beschrieben.

2.1 Regionalisierung allgemein

Bei der Regionalisierung kommt eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden zum Einsatz, die von Energieträger zu Energieträger, aber auch für denselben Energieträger von Projekt zu Projekt variieren.

Zweistufige
Regionalisierungen

Vielfach werden zweistufige Regionalisierungen genutzt, um den Gesamt-Ausbau zunächst auf ein Untergebiet aufzuteilen, und anschließend innerhalb dieser Gebiete eine andere Methodik für die feinere, teilweise anlagengenaue Verteilung zu nutzen.

Zuteilungsgrundlage für den ersten Schritt der Regionalisierung bieten hierbei beispielsweise politische Zielvorgaben (vgl. Ausbauzahlen Windenergie im Netzentwicklungsplan [31], und damit – in angepasster Form – auch in [32]). Aber auch bisherige Ausbaugeschwindigkeiten von Erneuerbaren Energien und deren Potentialgrenzen, siehe beispielsweise für die Zuteilungen von Photovoltaik (im Folgenden: PV) in [7; 16]) werden als Zuteilungsgrundlage genutzt.

Beispiele für
zweistufige
Regionalisierungen

Als erläuternde Beispiele werden zwei Projekte dargestellt, bei denen zweistufige Regionalisierungen genutzt werden. Die PV-Leistung wird in der Verteilnetzstudie-Hessen zunächst auf eine den Gemeinden untergelagerte, räumliche Einheit („erweiterte Ortslage“) aufgeteilt [7]. Der erste Schritt der Regionalisierung weist dabei Parallelen zum Vorgehen im Projekt „STERN“ [33] auf, welches das

gleiche Verfahren, aber aufgrund des größeren räumlichen Fokus keine nachgegliederte zweite Regionalisierung nutzt. Ebenso gibt es Parallelen zur Regionalisierung im Netzentwicklungsplan 2030 für die PV, wo Leistungen auf Gemeindeebene aufgeteilt werden [16]. Bei beiden Methoden werden im Wesentlichen zwei Treiber genutzt. Diese sind zum einen die historische Ausbaugeschwindigkeit des Teilgebiets und zum anderen das (technische) Potential des Teilgebiets [16; 33]. In der Szenarienerstellung in einem Projekt für das Bundesamt für Naturschutz [32] werden Ausbauziele für Windenergie auf Bundeslandebene genutzt, die sich wiederum an den Zielen der Netzentwicklungspläne [31] orientieren. In beiden Fällen wird also zunächst auf Bundeslandebene regionalisiert, um später eine genauere Verteilung je Bundesland vorzunehmen.

Begründet werden die mehrstufigen Verfahren unter anderem mit einer höheren Robustheit der Modelle und der möglichen Nutzung unterschiedlicher Treiber auf unterschiedlicher räumlicher Ebene [7], aber auch allgemein mit einer dadurch erreichten Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Studien [32].

Gründe für
zweistufige
Regionalisierungen

Der zweite Schritt der mehrstufigen Verfahren ist gewissermaßen mit den einstufigen Verfahren vergleichbar. Bei beiden kommen für die (verhältnismäßig feinträumige) Verteilung Bewertungsgrößen für Standorte zum Einsatz, die unter anderem folgende Eigenschaften beschreiben sollen, die für eine Zuteilung genutzt werden:

- die Wahrscheinlichkeit eines Zubaus (Windverteilung in [7])
- allgemein eine „Eignung“ (PV in [7])
- eine Priorisierung, die eine klare (qualitative oder zeitliche) Reihenfolge von Standorten repräsentieren soll ([32] und Offshore-Verteilung in [34])

Das Zustandekommen der Bewertungsgrößen ist hierbei unterschiedlich und reicht von der Nutzung von qualitativen Kriterien für eine Experteneinschätzung auf einer Skala (Beispiel: Standort von Windenergieanlagen im Wald für eine Experteneinschätzung der Wahrscheinlichkeitsänderung [7]), über die Nutzung quantitativer Modelle zur Ableitung der wirtschaftlichen Eignung (beispielsweise Nutzung von Ertragsmodellen in [7; 32]) bis hin zu komplexeren Mehr-Kriterien-Verfahren mit Verrechnung unterschiedlich gewichteter Bewertungsgrößen [32]. Auch die gestaffelte Verwendung einer Experteneinschätzung für den prioritären Zubau von Offshore-Windenergie mit anschließender Verwendung von wirtschaftlichen Bewertungsgrößen anhand von Küstenentfernungen und weiteren Kriterien für den Zubau findet Anwendung [34]. Teilweise werden stochastische

Arten von
Bewertungsgrößen

Elemente hinzugenommen, unter anderem, um ein Fehlen klar benennbarer Bewertungsgößen auszugleichen (vgl. PV-Freiflächenausbau in [33]), aber auch zur Abbildung von Unsicherheiten und zur möglichen Untersuchung von Streubreiten bei mehrfacher Verteilung [7].

Im Netzentwicklungsplan wird für die Modellierung der elektrischen Last keine direkte räumliche Anlagenverteilung, wohl aber eine sektoral unterschiedliche Verteilung genutzt, um eine nationale Last in Lastprofile je Landkreis zu erzeugen. Der Schwerpunkt liegt hier allerdings insbesondere auf dem Einfluss der Sektoren auf den zeitlichen Lastverlauf (vgl. Kapitel 2.3 in [35]).

Vergleich zu
Prognosen und
Planungen

Bei kurzfristigeren Szenarien (von der Anwendung damit vergleichbarer mit Prognosen) wie in der Dena Netzstudie II werden auch konkrete Daten der Flächenplanung (Windvorrangflächen und Eignungsgebiete) herangezogen, um eine in Zukunft installierte Leistung abzuschätzen [36].

2.2 Regionalisierung und Ausbaupfade Elektromobilität

Ausbaupfade

Ausbaupfade für Elektrofahrzeuge können sowohl auf Experteneinschätzungen und übergreifend-qualitativen Einschätzungen beruhen, wie in einer aktuellen Studie der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur, die gleichzeitig Substitutsmöglichkeiten einzelner Ladestellentypen durch einen verstärkten Ausbau anderer Ladestellentypen behandelt [37], als auch auf quantitativen Modellen wie Total-Cost-of-Ownership (im Folgenden: TCO), wie sie beispielsweise von TROST entwickelt wurden [38; 39]. Diese ortsunabhängige Ausbaupfad-Modellierung stellt keine Regionalisierung dar, ist für ebendiese aber eine wichtige Grundlage, da sie Gesamtzahlen für die Regionalisierung bereitstellt. Integrative Studien wie die der Agora Verkehrswende behandeln zudem die gesamte Spannweite vom Ausbaupfad bis zu den Netzausbaukosten aufgrund der Elektromobilität, die je nach Szenario beispielsweise mit 54 Mrd. € bis 108 Mrd. € benannt werden [40; 41].

Regionalisierung
von Elektro-
fahrzeugen und
Ladestellen

Für die Regionalisierung von Elektrofahrzeugen und Ladestellen existieren – ähnlich wie für elektrische Erzeuger und andere Verbraucher, wie im vorhergehende Kapitel gezeigt – grundsätzlich auch zahlreiche Methoden mit unterschiedlichsten Ansätzen und Komplexitäten. Für eine Übersicht sei insbesondere auf einen umfangreichen Review verwiesen, in dem internationale Studien untersucht und kategorisiert werden [15]. PAGANY ET AL. zeigen darin zunächst den starken Anstieg von Publikationen zu den Themen Elektrofahrzeuge und Ladestellen ab 2008 und wählen anschließend Publikationen mit räumlicher Modellierung („location modeling“) für eine genauere Untersuchung aus. Die Regiona-

lisierungsmodelle werden dabei nach ihrer Art kategorisiert. So werden eine Orientierung nach Nutzer oder Zielort und eine Orientierung nach Routen unterschieden, und die angewandten Methoden weiter in Unterkategorien unterteilt, beispielsweise danach, ob Bedarfsdichten („Demand density“) modelliert werden.

Im Folgenden werden einige Methoden genauer dargestellt. Einige dieser Studien wurden vom Autor schon in bestehenden Veröffentlichungen [13; 14] genannt und analysiert.

Einfachere Untersuchungen mit räumlicher Analyse bauen mehrfach auf der Verteilung der Bevölkerung oder dem Vorkommen von Kraftfahrzeugen auf, teilweise ergänzt um Gewichtungsfaktoren für das Berufspendlerverhalten [7; 8]. Auch im Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans 2030, Version 2019, wird die Elektromobilität auf Landkreisebene über die pauschale Betrachtung der prognostizierten Pkw mit einem Faktor für die Elektrifizierung bestimmt [42].

Einfache
Verteilungen

Modelle, die mehrere Faktoren zur Festlegung von Ladestellen nutzen, optimieren vielfach die Verteilung der Ladestellen. Diese Modelle sind häufig stark von den verfügbaren Daten abhängig und stellen meist nur einen bestimmten Ladestellentyp zur Diskussion, teilweise auch eine ganz spezifische Anwendung wie der optimalen Verteilung auf US-amerikanischen Bundesstraßen [43]. Bei Modellen für den städtischen Raum gibt es Modelle zur Abdeckung von Fahrtwegen [10; 44] oder allgemeiner eine Abdeckung städtischer Räume, teilweise mit Voronoi-Diagramm-ähnlichen Mustern [9], vgl. auch die oben genannte Einteilung von PAGANY ET AL. [15]. Arbeiten zur Routenplanung gehen bis hin zu komplexen Multi-Objective-Optimierungsfunktionen [45], sind in der zuletzt genannten Quelle allerdings stark geometriefokussiert, ohne die entsprechende Bedeutung der jeweiligen städtischen Räume und Straßen hinter einem Straßennetz im Detail zu berücksichtigen. Einen wieder anderen Fokus wählen WANG ET AL. Sie unterscheiden explizit verschiedene Ladetypen und berücksichtigen detailliert den Ladezustand der Batterien [46]. Andere Untersuchungen rücken Umweltkosten in den Fokus der Betrachtung [47; 48].

Multifaktorielle
Modelle

Beispiele für Untersuchungen, die – neben anderen Faktoren – Points of Interests (im Folgenden: POI) für eine Bestimmung an Bedarfsdichten nutzen, finden sich sowohl in relativ frühen Untersuchungen von 2012 [49], als auch in neueren Untersuchungen von 2019 [50]. Die letztgenannte Quelle enthält dabei auch eine Behandlung des Standes der Forschung, der wie die vorliegende Arbeit Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den Ansätzen beschreibt, und führt als Schlussfolgerung richtigerweise aus, dass für einen effizienten und nachhaltigen Ansatz Gebiete betrachtet und Nachbarschaftsverhältnisse („neighborhood relations“)

Nutzung von Points
of Interest in der
Forschung

berücksichtigt werden sollten, um eine Überversorgung in bestimmten Gebieten zu vermeiden.

Komplexere
Modelle für
Schnellladestellen

In für den deutschen Raum entwickelten Modellen wie im „Standortfindungsmodell für elektrische Ladeinfrastruktur“ (im Folgenden: „STELLA“) der RWTH Aachen werden eine Vielzahl von raumspezifischen Daten (Siedlungsstruktur, Fahrzeugbesitzmodellierung, usw.) und „Methoden [...] ähnlich zu Verfahrensweisen aus dem Bereich der Verkehrsmodellierung“ mit einbezogen, um Ladebedarfe für Elektromobilität zu bestimmen [51]. Die hierbei prognostizierten Ladebedarfe werden in ein Gitternetz aufgeteilt. Besonderheit dieses Modells ist, dass es im Rahmen des Forschungsprojektes „SLAM – Schnellladenetz für Achsen und Metropolen“ in einen konkreten Ausbau eines Forschungsladenetzes münden soll, auch dieser bezieht sich jedoch auf einen Typ Ladestellen, nämlich Schnellladestellen [52]. Auch das „Nubia“ Modell der IAV nutzt umfangreiche (Mobilitäts-) Daten und erstellt zunächst potentielle Ladebedarfe, um auf ideale Standorte im öffentlichen Raum zu schließen. Es weist damit Parallelen zum vorhergenannten „STELLA“-Modell auf. Das „Nubia“-Modell setzt dabei auf maschinelles Lernen, um u.a. Parkorte und mögliche Verbräuche in geclusterten Regionen zu untersuchen. Es bezieht sich wiederum allerdings nur auf eine begrenzte Beispielregion [53].

Anwendungsgebiet
und Komplexität
weiterer Modelle

Eine Vielzahl von Eingangsdaten und eine grundsätzliche Anwendbarkeit in Deutschland werden in verschiedenen Arbeiten des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt e.V. (DLR) adressiert, wobei teils agentenbasierte Modellierungen genutzt werden [54]. Das Standort-Tool des DLR, das neben elektrischen Ladestellen auch Ausbaupotentiale von Wasserstofftankstellen adressiert [55], wird auch in einem Förderaufruf aufgegriffen [56]. Es ist nicht zu verwechseln mit dem ebenfalls Standort-Tool genannten Modell für die Region Hamburg [57].

Einordnung der
Regionalisierung in
den Gesamtkontext
der Mobilität

In der gesamten Breite der Forschungen zu den Auswirkungen des Ladestellenausbaus auf das Energiesystem stellt die Frage nach der Regionalisierung allerdings nur einen Teilaspekt dar: Bei einer Konferenz zum Thema Elektromobilität und Systemintegration (1st E-Mobility Power System Integration Symposium in Berlin 2017) liegt der Fokus der Energiesystemtechnik-Beiträge insbesondere auf der zeitlichen Abfrage des Ladestroms und des Nutzerverhaltens. Beschriebene räumliche Modelle beziehen sich insbesondere auf die Routenplanung und Ladevorgänge bei schon bestehenden Ladesäulen oder kleinräumigen Beispielregionen (vgl. Programm des E-Mobility Power System Integration Symposium in [58] und Einzelbeiträge zu genannten Themen beispielsweise in [59–61]). Und auch übergreifend ist zu beachten, dass auch (elektrische) Pkw im Ganzen nur

einen kleinen Teil des Themenfelds ‚Mobilität‘ beschreibt, wie in [62] dargestellt wird.

2.3 Herausforderungen, Übertragbarkeit und Anwendungen

Wie in den Kapiteln 2.1 und 2.2 beschrieben, gibt es verschiedenste Studien und Modelle sowohl zur Regionalisierung von Elektrofahrzeugen und deren Ladestellen, als auch von anderen dezentralen elektrischen Energieerzeugern und -verbrauchern wie Erneuerbaren Energien und Wärmepumpen. Unterschiede in der Ausgangslage und damit Herausforderungen für die Regionalisierung von Elektrofahrzeugen ergeben sich unter anderem durch folgende Begebenheiten:

Unterschiede zu anderen Anlagenregionalisierungen

- Als Basis für eine Verteilung kann keine physikalisch abgeleitete Größe genutzt werden, wie in einem Ertragsmodell für Erneuerbare Energien, aus dem sich wirtschaftliche Eignung und damit eine Wahrscheinlichkeit ableiten lässt.
- Weniger Erfahrung mit dem Ausbau ergeben größere Unsicherheiten, beispielsweise bei Experteneinschätzungen.

Nichtsdestotrotz lohnt sich die Überlegung, wo es Übertragbarkeiten geben kann, um mit einer breiteren Sichtweise Ansätze für die Regionalisierung von Elektrofahrzeugen einzubeziehen und schon gemachte Ansätze nutzen zu können. Während eine Übertragbarkeit der Methoden aufgrund des anderen inhaltlichen Themas und auch der oben genannten Aspekte nicht automatisch gegeben ist, sind anhand einzelner Verfahren zumindest grundsätzlich mögliche Parallelen erkennbar: So ließe sich beispielsweise für die zwei wichtigsten Treiber der PV-Regionalisierung in [7] jeweils eine mögliche Entsprechung finden: Der gesamte Fahrzeugverkehr könnte der Potentialgrenze entsprechen und einen Bedarf oder auch eine Affinität und Kaufkraft für Elektromobilität könnte man als Parallele zur relativen PV-Ausbaugeschwindigkeit in kleineren Räumen interpretieren.

Übertragbarkeiten

Zudem erscheint es sinnvoll, sich über Übertragbarkeiten und Unterschiede für die Validierung von Modellergebnissen Gedanken zu machen: Als disruptive Technologie stellt die Elektrifizierung des Verkehrsbereichs und damit die Verteilung von Ladestellen eine neuartige Situation dar, dessen zeitlich-räumlicher Verlauf der Verbreitung in dieser Form nur schwer mit einer erfolgten Entwicklung abzugleichen ist. Weder ein Vergleich mit einem anderen Land noch mit einer anderen Technologie ist ohne weiteres möglich und geplante Ausbaustände übertreffen den heutigen Ausbau deutlich, wodurch ein Backtesting anhand der Ausbauzahlen der vergangenen Jahre weniger aussagekräftig ist als bei einem weiter fortgeschrittenen Ausbau.

Unterschiede in der Validierung

Unterschiedliche Modelle für unterschiedliche Anwendungen

Neben den Herausforderungen der Modellierung und möglichen Übertragbarkeiten von anderen Regionalisierungen auf die Elektrofahrzeug-Ladestellen sind auch unterschiedliche Anwendungsbereiche zu unterscheiden, um eine zielgerichtete Forschungsarbeit zu begründen: Verschiedene Arbeiten adressieren zur Regionalisierung von Elektrofahrzeugen entweder bestimmte Beispielgebiete, oder setzen Optimierungsverfahren ein, um eine ideale Verteilung (unter unterschiedlichen Gesichtspunkten) zu bestimmen. Um aber Auswirkungen auf das Stromnetz abbilden zu können, erscheint das nicht zweckmäßig: Zum einen müssen Modelle für alle Bereiche der Ladeinfrastruktur geschaffen werden. Zum anderen braucht es für Netzstudien eine plausible bzw. realistische Verteilung, auch bezogen auf einen Zwischenentwicklungstand, aber nicht unbedingt eine optimale Verteilung. Gleichzeitig ist in Frage zu stellen, ob eine pauschale Betrachtung über nur einzelne Kenngrößen wie die Bevölkerung oder die Gesamtfahrzeugzahl ausreichend ist. Dies gilt insbesondere, da die Elektrofahrzeuge weniger für die Übertragungsnetze, sondern insbesondere für die darunter gelagerten Ebenen eine Herausforderung darstellen könnten, wie in [63] dargestellt wird. Dies bedeutet zudem auch, dass eine Auflösung von Regionalisierungen erreicht werden muss, die eine Zuordnung zu einzelnen Anschlusspunkten im Verteilnetz erlaubt, was bei Ansätzen mit einer gebietsweisen Rasterberechnung je nach Rastergröße nicht gegeben ist.

Abgeleiteter Forschungsbedarf

Somit existieren zahlreiche Ansätze und Methoden im Themenfeld Regionalisierung von Elektrofahrzeugen und deren Ladestellen. Für die Anwendung im Bereich von (Verteil-) Netzstudien in Deutschland erscheint es allerdings angebracht, hier weitere Forschungsarbeit zu leisten, zumal die in Kapitel 1.4 genannten Merkmale für ein Modell in dieser Kombination im bisherigen Stand der Forschung nicht abgebildet werden. Mit diesem Untersuchungsgegenstand hebt sich die vorliegende Arbeit damit auch vom Stand der Forschung ab.

Abgeleitete Übertragbarkeiten Modellstruktur

Für die grundlegende Modellstruktur lassen sich Übertragbarkeiten aus dem Stand der Forschung identifizieren: Die vielfach gewählte zweistufige Vorgehensweise für die Regionalisierung (vergleiche Kapitel 2.1 und 2.2) erscheint auch für die vorliegende Fragestellung aus mehreren Gründen hilfreich: Erstens sind mögliche Modellfehler gut eingrenzbar auf die jeweilige Modellierungsebene (vgl. [7]), sodass das Modell robuster wird. Zweitens lässt eine Regionalisierung auf Gemeindeebene zunächst eine Übertragbarkeit von bundesweiten Szenarien auf kleinere Regionen zu, für die dann jeweils eine – berechnungstechnisch ggf. aufwendige – Detailregionalisierung durchgeführt werden kann, sodass das Modell besser skalierbar wird. Während modelltheoretisch auch ver-

schiedenste andere Zwischenebenen wie beispielsweise Kreise oder Postleitzahlgebiete denkbar wären, spricht die Verfügbarkeit von verschiedenen Statistiken wie Pendlerstatistiken [64] und Demografiemodellen [65; 66] für die Wahl von Gemeinden als Zwischenschritt der Modellierung.

3 Methodik

Die im Rahmen des Promotionsvorhabens entwickelte Methodik zur punktgenauen Regionalisierung von Elektrofahrzeug-Ladestellen baut auf der Analyse des Standes der Forschung (siehe Kapitel 2) auf, und verfolgt die Beantwortung der forschungsleitenden Fragestellung (siehe Kapitel 1.2).

Gliederung in
Teilmodelle

Abbildung 1 zeigt die wichtigsten Modellelemente und Kapitel dieser Arbeit. Unterschieden wird zwischen der Regionalisierung auf Gemeindeebene (Kapitel 3.1 und 3.2) und der darauf aufbauenden – für die wissenschaftliche Arbeit zentralen – Detailregionalisierung von Ladestellen bis zur konkreten Position der Ladestelle (Kapitel 3.3 bis 3.6).

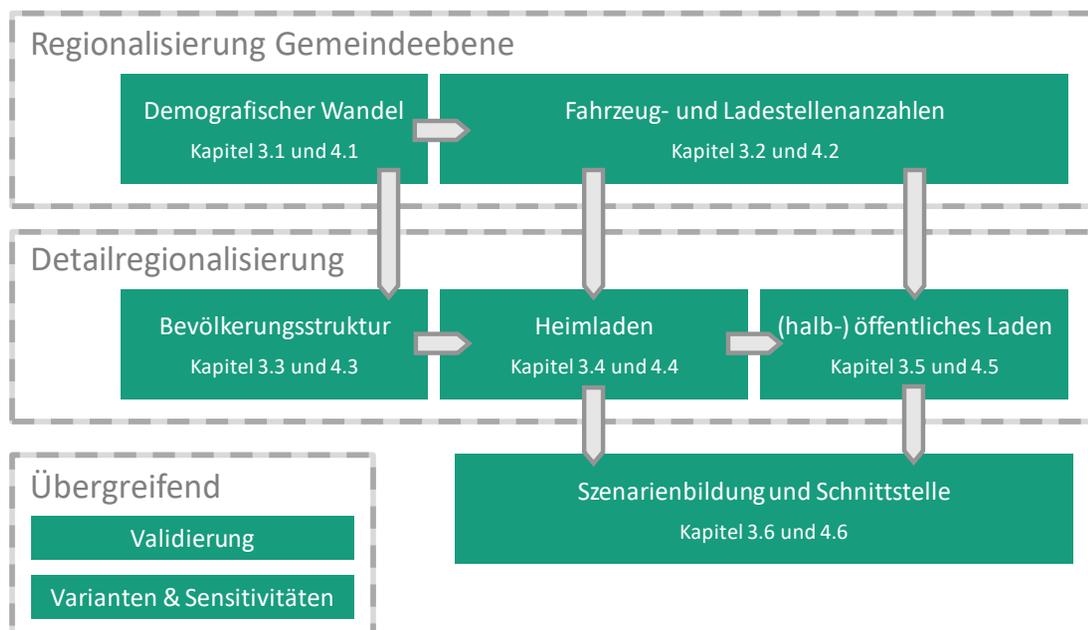


Abbildung 1: Übersicht Modellelemente mit Kapitel-Referenzen

Durch die Gliederung in Teilmodelle ist das Modell schrittweise prüfbar und ermöglicht eine modulare Weiterentwicklung. Die Modellierung ist in Python umgesetzt und nutzt die Bibliotheken [67–72]. Den Methodik-Kapiteln steht jeweils ein entsprechendes Kapitel mit den Modellergebnissen (siehe Kapitel 4.1 bis Kapitel 4.6) gegenüber. Die Entwicklung der Methodik und ihre Anwendung und Auswertung anhand von quantitativen Daten bilden gemeinsam das Ergebnis dieser Forschungsarbeit.

3.1 Gemeindeebene: Demografischer Wandel

Schon 2004 weisen DALKMANN UND BÖHLER auf die gegenseitige Bedeutung des demografischen Wandels – insbesondere wachsender und schrumpfender Gebiete – und der Mobilität hin [73]. Auch vor dem Hintergrund von Bevölkerungs-

prognosen, die bis 2030 [66], insbesondere aber bis 2040 und bezogen auf bestimmte Altersgruppen [65] für etliche Gemeinden starke Veränderungen zeigen, erscheint damit eine Berücksichtigung des demografischen Wandels schon auf Gemeindeebene sinnvoll.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Themen sind teilweise vom Autor im Artikel „Modeling Spatial Charging Demands Related to Electric Vehicles for Power Grid Planning Applications“ veröffentlicht [13] und wurden in der Masterarbeit von THOMSEN [74], die fachlich vom Autor betreut wurde, behandelt.

Bestehende Paper und Masterarbeit

Bestehende Paper
und Masterarbeit

Zielsetzung der Modellierung des demografischen Wandels auf Gemeindeebene ist es, eine Grundlage für die Verteilung von Fahrzeugen und Ladestellen (in Kapitel 3.2 beschrieben) zu schaffen.

Zielsetzung des
Kapitels

Dafür wird in Kapitel 3.1.1 zunächst beschrieben, welche bestehenden Datensätze und Modelle es gibt und inwieweit sie den Anforderungen entsprechen, die sich aus der Zielsetzung ergeben:

Struktur des
Kapitels

- Es muss ein ausreichender Datenumfang vorhanden sein. Dies umfasst:
 - Die Bevölkerungsänderung ist auf Gemeindeebene verfügbar oder ist auf Gemeindeebene übertragbar.
 - Der demografische Wandel deckt den Zeitraum bis 2040 ab, um den Mittel- bis langfristigen Ausbau der Ladeinfrastruktur abbilden zu können.
 - Die Datenverfügbarkeit besteht für ganz Deutschland.
- Es muss eine Aktualisierungsmöglichkeit bestehen

Darauf aufbauend wird in 3.1.2 erläutert, wie diese Datensätze genutzt und ergänzt werden können, um diese Anforderungen zu erfüllen.

3.1.1 Bestehende Daten und Modelle

Grundsätzlich stehen verschiedene demografische Datensätze zur Verfügung, die als Grundlage herangezogen werden können, beispielsweise:

Die Bertelsmann-Stiftung stellt über das Datenportal „Wegweiser Kommune“ Daten zum demografischen Wandel je Kommune zur Verfügung [66]. Die Daten lassen sich über das Portal und das einheitliche Format grundsätzlich aktualisieren, der Datenumfang umfasst ganz Deutschland. Einschränkungen ergeben sich

dadurch, dass die Daten nur die demografischen Änderungen bis 2030 abdecken und kleinere Gemeinden zusammengefasst werden. Die Bertelsmann-Stiftung hat eine Historie an Untersuchungen und Veröffentlichungen zum demografischen Wandel vorzuweisen [75], womit von einer hoher Expertise in diesem Bereich auszugehen ist.

Die Pressestelle Information und Technik Nordrhein-Westfalen stellt je Gemeinde die mögliche Bevölkerung bis 2040 zur Verfügung [65]. Einschränkungen ergeben sich naturgemäß dadurch, dass die Daten nur für Gemeinden in NRW bereitgestellt werden. Vergleichbare Bevölkerungsvorausberechnungen – allerdings mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad und unterschiedlichen abgedeckten Jahren – lassen sich für verschiedene Bundesländer finden [76; 77].

Das Statistische Bundesamt erstellt Bevölkerungsvorausberechnungen mit unterschiedlichen Varianten, die jedoch nur auf Ebene der Bundesländer verfügbar sind [78; 79].

Fazit bestehende
Daten

Die vorgenannten Quellen erfüllen die Anforderungen jeweils nur in Teilen. Dem Autor ist keine Quelle bekannt, die alle Anforderungen in Kombination erfüllt. Deswegen wurde für den Anwendungsfall eine eigene Modellierung (siehe Masterarbeit von THOMSEN [74]) konzipiert und umgesetzt. Ziel der Modellierung ist hierbei nicht die qualitative Verbesserung der Datensätze, sondern die Abdeckung des benötigten Zeitrahmens bis 2040. Hierzu werden die Daten der Bertelsmann-Stiftung als Grundlage genutzt und die demografische Entwicklung bis 2040 fortgeschrieben. Zusätzlich werden die dort zusammengefassten kleineren Gemeinden aufgeteilt, um eine einheitliche Regionalisierung auf Gemeindeebene zu ermöglichen.

3.1.2 Jährliche Modellierung und Sonderfall kleine Gemeinden

Aspekte
Bevölkerungs-
änderung

Die Fortschreibung von Bevölkerungszahlen auf Gemeindeebene erfordert die Berücksichtigung von Änderungen, wie der Sterberate, Geburtenrate und Zu- bzw. Fortzüge [74; 80]. Diese Elemente sind altersspezifisch und erfordern die Aufteilung der Bevölkerung in Altersgruppen, die im Grundlagendatensatz [66] zunächst nicht gegeben ist. Sie kann aber durch eine Bestimmung der Einzelaltersfaktoren aus den Zensusdaten 2011 [81] und der Übertragung auf die gemeindeweiten Zahlen erreicht werden, womit eine Personenanzahl je Gemeinde und je Alter für das Jahr 2030 abgeleitet werden kann [74].

Aufbauend darauf wird die Altersstruktur von 2030 bis 2040 je Gemeinde in Deutschland fortgeschrieben, sie setzt sich – jährlich rollierend – aus den folgenden Änderungen zusammen [74]:

- Sterbefälle (basierend auf [82])
- Geburten spezifisch für die Region (basierend auf [83])
- Nettozuzüge (bzw. Nettofortzüge, basierend auf [84]).

Jährliche
Bevölkerungs-
änderung

Ein Sonderfall ergibt sich für Gemeinden mit unter 5.000 Einwohnern, da diese in dem Datensatz für 2030 [66] jeweils kreisweit zusammengefasst sind. Es lässt sich ein gemeindegenaue Datensatz erstellen, in dem auch hier die heutigen Verhältnisse der Bevölkerungszahlen auf die Prognosedaten für 2030 übertragen werden [74]. Dies impliziert die Annahme, dass die relative Änderung in allen Gemeinden unter 5.000 Einwohnern in einem Kreis vergleichbar ist. Dabei wird sowohl die Entwicklung der zusammengefassten Gemeinden je Kreis, als auch deren Bevölkerungsanzahl (Basis 2017) berücksichtigt.

Sonderfall kleine
Gemeinden

Zusammenfassend steht also ein Modell mit jährlicher Fortschreibung zur Verfügung, mit denen eine Bevölkerungszahl je Gemeinde, je Alter, je Geschlecht und je Jahr bestimmt werden kann.

3.2 Gemeindeebene: Fahrzeug- und Ladestellenanzahlen

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, bietet die Regionalisierung in zwei Stufen Vorteile, wobei sich als erste Regionalisierungsstufe die Gemeinden aufgrund der breiten, einheitlichen Datenverfügbarkeit anbieten. Deswegen wird eine Methodik entwickelt, zunächst für alle Gemeinden in Deutschland eine mögliche Anzahl an Fahrzeugen und Ladestellen zu bestimmen.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Themen sind teilweise vom Autor im Artikel „Modeling Spatial Charging Demands Related to Electric Vehicles for Power Grid Planning Applications“ veröffentlicht [13].

Bestehendes Paper

Bestehendes Paper

Verschiedene bestehende Forschungsarbeiten bestimmen mögliche nationale Ausbaupfade für Fahrzeuganzahlen und Ladestellenanzahlen. Je nach Anwendung kommen dabei zum Beispiel Modelle mit Total-Cost-of-Ownership-Ansatz (im Folgenden: TCO), wie sie unter anderem von TROST entwickelt wurden [38; 39], zum Einsatz und bieten den Vorteil einer in Einzelschritten prüfbar, auf Kaufentscheidungen beruhenden Änderung der Fahrzeugflotte. Einen anderen Weg wählt die Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, die mögliche Ausbaupfade

Thematische
Kapiteleinleitung

allgemeiner anhand von Experteneinschätzungen skizziert, dabei aber auch Überlegungen zu Substitutionsmöglichkeiten einzelner Ladestellentypen durch einen verstärkten Ausbau anderer Ladestellentypen einbezieht [37].

Zielsetzung des Kapitels

Die vorliegende Arbeit setzt an dieser Stelle an. Solche nationalen Ausbauszenarien sollen auf einzelne Gemeinden übertragen werden, wobei die Methodik unabhängig von den konkreten Eingangsdaten bleibt. Dadurch können flexibel unterschiedliche Rahmenszenarien genutzt werden. Zielsetzung ist, die Anzahlen von Fahrzeugen und Ladestellen auf Gemeindeebene zur Verfügung zu stellen, dabei lokale Besonderheiten zu berücksichtigen und durch den Modellaufbau und die Dateneinbindung eine Aktualisierbarkeit sicherzustellen.

Struktur des Kapitels

Dafür wird in Kapitel 3.2.1 zunächst hergeleitet, welche Eingangsdaten genutzt und welche Ausgangsdaten generiert werden sollen. Die Eingangsdaten müssen anschließend zusammengeführt werden. Dies erfolgt anhand von Gewichtungsfaktoren, wie es in Kapitel 3.2.2 beschrieben wird.

3.2.1 Eingangsdaten und gewünschte Ausgangsdaten

Top-Down-Verfahren

Um nationale Szenariendaten auf Gemeinden zu übertragen, und dabei lokale Parameter zu berücksichtigen, wird ein Top-Down-Verfahren [85] mit folgenden Eingangsdaten verwendet:

- die zu übertragenen, nationalen Eingangsdaten
- die lokalen Parameter, die zu einer Quote zusammengefasst werden, nach denen die nationalen Eingangsdaten auf Gemeinden übertragen werden.

Bestehende Daten

Für die nationalen Eingangsdaten, also die Anzahl der Fahrzeuge und die Anzahl der Ladestellen je Fahrzeug, werden die folgenden Quellen verwendet:

- Szenariendaten, die von FRISCHMUTH erstellt wurden und gemeinsam mit dem Autor und weiteren Autoren in [13] publiziert wurden. Die von TROST entwickelte Methodik [38; 39] liegt dabei dem Modell zu Grunde.
- Die Studie „Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf“ der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur [37].

Die erstgenannten Szenariendaten wurden in einer vorhergehenden Publikation [13] genutzt. In der vorliegenden Arbeit wurden diese mit zweitgenannten Szenariendaten für die Anzahl der Ladestellen je Fahrzeug kombiniert, um eine Vergleichbarkeit der Studien zu gewährleisten.

Für die Verwendung der nationalen Daten gilt es, einen Faktor für die Aufteilung auf die Gemeinden zu bilden. Dafür sollten die wichtigsten Parameter für die Anzahl an Fahrzeugen (und damit Ladestellen) für die jeweiligen Gemeinden berücksichtigt werden. Eine Methodik, bei der solche Parameter zu einem Verteilfaktor zusammengefasst werden, findet sich in der Verteilnetzstudie Hessen [7], und ist aufgrund der vergleichbaren Problemstellung übertragbar. Das Verfahren wurde angepasst und aktualisiert, zum einen, um das geänderte Szenarienjahr zu berücksichtigen und zum anderen wurden die genutzten Parameter in der Expertenrunde des Projektkonsortiums von „Ladeinfrastruktur 2.0“ diskutiert und im Ergebnis durch den Einfluss der (bisherigen) Fahrzeugmeldungen ergänzt. Zum dritten ist die Zielgröße mit gemeindeweiten Zahlen eine andere, in der Verteilnetzstudie Hessen wurde eine kleinere Raumgröße unterhalb der Gemeinden (Ortsteile) gewählt. Genutzt werden damit die folgenden Parameter, für die eine Übersicht vom Autor auch in [13] publiziert wurde:

- Als Grundzuteilungsgröße:
 - Einwohner, Datenstand 2017 [86]
- Weitere Größen, um spezifische lokale Begebenheiten zu berücksichtigen:
 - gemeindespezifischer demografischer Wandel, siehe Kapitel 3.1.
 - gemeldete Pkw je Einwohner, ohne gewerbliche Halter (eigene Berechnung und [87])
 - Auspendler:innen der Gemeinden [64]

3.2.2 Faktorbildung und Berechnungsschritte

Mit den zuvor genannten Größen lässt sich damit die Anzahl der nationalen Elektrofahrzeuge wie folgt aus den Szenarien auf Gemeinden übertragen: Für jede Gemeinde wird eine Zuteilungsgröße bestimmt, die sich aus der Multiplikation der Einwohner mit den drei Faktoren für den demographischen Wandel, für die gemeldeten Pkw je Einwohner, und für die Pendler:innen bestimmt. Zudem wird die Summe der Zuteilungsgrößen über alle Gemeinden in Deutschland bestimmt. Per Dreisatz wird die Anzahl der Elektrofahrzeuge für die entsprechende Gemeinde bestimmt: Die Zuteilungsgröße wird geteilt durch die Summe der Zuteilungsgrößen und multipliziert mit der Gesamtzahl der Elektrofahrzeuge. Das entspricht einer Top-Down-Berechnung, wie sie unter anderem in [7; 85] beschrieben wird.

Mit der Anzahl der Elektrofahrzeuge und einem Faktor für die Ladestellen je Elektrofahrzeug ergibt sich insgesamt die folgende Formel [13]:

Formel
Faktorbildung

$$n_{ls, j} = f_{ls/e-pkw} \times n_{e-pkw, j} = f_{ls/e-pkw} \times \frac{E_j \times f_{demogr, j} \times f_{pkw/e, j} \times f_{pendl, j}}{\sum_i (E_i \times f_{demogr, i} \times f_{pkw/e, i} \times f_{pendl, i})} \times n_{e-pkw, DE} \quad (1)$$

mit den folgenden Formelzeichen und Indizes:

j:	Betrachtete Gemeinde, für welche die Ladestellenanzahl bestimmt wird	n _{ls} :	Anzahl Ladestellen
i:	Zähler für Summe aller Gemeinden	n _{e-pkw} :	Anzahl Elektrofahrzeuge
E:	Einwohner	f _{ls/e-pkw} :	Ladestellen je Elektrofahrzeug
DE:	in Deutschland	f _{demogr} :	Faktor für den demografischen Wandel
		f _{pkw/e} :	Gemeldete Pkw je Einwohner
		f _{pendl} :	Faktor für Pendler.

Die Faktoren für den demografischen Wandel und die gemeldeten Pkw ermitteln sich direkt aus dem Verhältnis der zukünftigen Bevölkerung zu der heutigen Bevölkerung, bzw. den gemeldeten Pkw je Einwohner. Der Faktor für die Pendler:innen wird aufgespannt zwischen einem Minimalwert (0,71 für die Gemeinde mit den wenigsten Auspendler:innen je Einwohner, entsprechend [13]) und einem Maximalwert (1,22 für die Gemeinde mit den meisten Auspendler:innen je Einwohner, entsprechend [13]). Der Faktor für die Ladestellen je Elektrofahrzeug $f_{ls/e-kfz}$ wird als konstant entsprechend Tabelle 1 angenommen und ergibt sich aus [37]. Die Modellierung eines räumlich differenzierten Faktors aufgrund unterschiedlicher Eingangsgrößen wird im Ausblick-Kapitel diskutiert.

Tabelle 1: Anteile Ladestellentypen nach [37]

Ladestellentyp	Anteil an allen Ladestellen	Ladestellen je Elektrofahrzeug $f_{ls/e-pkw}$
Heimladen	68,0 %	0,701 x 68,0 % = 0,477
(halb-) öffentliches Laden	6,5 %	0,701 x 6,5 % = 0,046
Sonstige	25,5 %	
Gesamt	100,0 %	0,701

Bereitstellung
150 %iger Ausbau
für Szenarien

Wie in der Einleitung (Kapitel 1.4.1) erläutert, ist die Bildung von nationalen Ausbauszenarien nicht Teil der Promotion. Es soll jedoch eine Methodik bereitgestellt werden, die eine Szenarienbildung mit abweichenden Ausbauszahlen ermöglicht und das bei kurzen Berechnungszeiten. Es werden deswegen in den nachfolgenden Detailregionalisierungen mehr Orte für Fahrzeuge und Ladestellen bestimmt als in der Regionalisierung auf Gemeindeebene. Mit der Formel (1)

wird der Basisfall berechnet. In den Detailregionalisierungen werden im Vergleich dazu 50% mehr Fahrzeuge und Ladestellen modelliert, womit sich ein breiter Bereich an reduzierten oder zusätzlichen Ladestellen für einzelne Ladestellentypen modellieren lässt.

Die oben genannten Verteilgrößen sind geeignet für die Modellierung der Ladestellentypen Heimpladen und (halb-) öffentliches Laden, die hier Untersuchungsgegenstand sind (siehe Kapitel 1.4). Werden andere Ladestellentypen abgebildet, wie beispielsweise Ladestellen für Mitarbeiter:innen an Firmenstandorten, bieten sich alternative Berechnungswege an, wie die Nutzung von Beschäftigten statt Einwohnern [64] und Einpendler:innen statt Auspendler:innen, wie es vom Autor in [7] und im Projekt „Ladeinfrastruktur 2.0“ umgesetzt wurde.

Abgrenzung
Ladestellentypen

3.3 Detailregionalisierung: Bevölkerungsstruktur

Die Anforderung für die Ladenstellenverteilung ist Punktgenauigkeit (vgl. Kapitel 1.2), auch die Nutzung der sozioökonomischen Daten erfordert damit eine solche Auflösung. Bei der Modellierung einzelner Haushalte ergeben sich dabei zwei Herausforderungen: Zum einen muss eine für das Modell angemessene, plausible Verteilung von Haushaltseigenschaften erstellt werden, wobei eine deutschlandweite Anwendung ermöglicht werden soll. Zum anderen muss die demografische Änderung (siehe auch Kapitel 3.1) bis auf die Haushaltsebene herunter übertragen werden.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Themen sind teilweise vom Autor im Artikel „Modeling Spatial Charging Demands Related to Electric Vehicles for Power Grid Planning Applications“ veröffentlicht [13] und werden teilweise in der Masterarbeit von THOMSEN [74], die fachlich vom Autor betreut wurde, behandelt.

Bestehendes Paper
und Masterarbeit

Bestehendes Paper und Masterarbeit

Es zeigt sich eine hohe Abhängigkeit von sozioökonomischen Faktoren für die Kaufentscheidung eines Elektrofahrzeugs [88; 89]. Einige der Unterschiede könnten sich in Zukunft etwas abschwächen (vergleiche auch [6]):

Thematische
Kapiteleinleitung

- Ein höheres Angebot an öffentlicher Ladeinfrastruktur könnte die Unterschiede zwischen Haushalten in Einfamilienhäusern und (auch großen) Mehrfamilienhäusern abmildern, weil die Möglichkeit einer eigenen Ladestelle dann gegebenenfalls weniger wichtig für eine Kaufentscheidung ist.
- Eine generell höhere Verbreitung von Elektrofahrzeugen und eine mögliche Preisreduzierung könnten die Unterschiede zwischen Haushalten mit unterschiedlichem Einkommen abmildern.

Da der Fokus der vorliegenden Untersuchung auf dem Ausbaupfad der Elektromobilität (einschließlich der Zwischenschritte) liegt, ist die Berücksichtigung der sozioökonomischen Faktoren nichtsdestotrotz zentral, geht es doch gerade um eine Differenzierung möglicher Haushalte und damit Orte für den fortschreitenden Ausbau der Lademöglichkeiten. Es muss also ein „geografisch hochaufgelöstes Bild der Bevölkerung“ [74] generiert werden, wie es THOMSEN formuliert. Dafür wird eine synthetische Bevölkerung generiert, die „ein vereinfachtes mikroskopisches Abbild der tatsächlichen Bevölkerung“ [74] ist, wie THOMSEN unter Verweis auf die englische Definition der „Synthetic Population“ der Technischen Universität München [90] beschreibt. Zentral ist dabei die Übertragung der für den Anwendungsfall relevanten Attribute [74], was die synthetische Bevölkerung gemein hat mit einem auch deutlich allgemeiner gefassten Modellbegriff, beispielsweise dem von THOMMEN [91].

Zielsetzung des Kapitels

Daraus entsteht die Zielsetzung, aus verschiedenen Eingangsdaten, wie dem gemeindeweiten demografischen Wandel, gröber aufgelösten Bevölkerungsstrukturdaten und Gebäudedaten, einen Datensatz mit hochaufgelösten Bevölkerungsdaten zu generieren, der eine Zuordnung von Elektrofahrzeugen und Ladestellen ermöglicht.

Struktur des Kapitels

Dafür werden zunächst die auf Straßenabschnittsebene vorhandenen Bevölkerungsstrukturdaten aus [86] genutzt, um für jeden Straßenzug synthetische Einzelhaushalte zu generieren, siehe Kapitel 3.3.1. Dabei wird anhand eines Iterative-Proportional-Fitting-Algorithmus (im Folgenden: IPF) nicht nur die Gesamtanzahl der Attribute, sondern auch die statistisch wahrscheinlichste Kombination dieser sozioökonomischen Attribute berücksichtigt. Mit der Festlegung der Ist-Haushalte wird der Grundstein gelegt, um in Kapitel 3.3.2 durch gezielte Hinzu- oder Wegnahme von Haushalten die zukünftige Bevölkerung unter Berücksichtigung des demografischen Wandels abzubilden. Diesen wird schließlich auch innerhalb eines Straßenzugs ein konkretes Gebäude und damit Standort zugewiesen, wobei sowohl die Adressdaten, als auch die Gebäudefunktion und das Gebäudevolumen berücksichtigt werden.

Die Elemente ‚Demografischer Wandel‘ und ‚Bevölkerungsstruktur‘ aus der vereinfachten Modellstruktur in Abbildung 1 lassen sich somit wie in der folgenden Abbildung 2 detaillierter darstellen:

Schaubild der Struktur

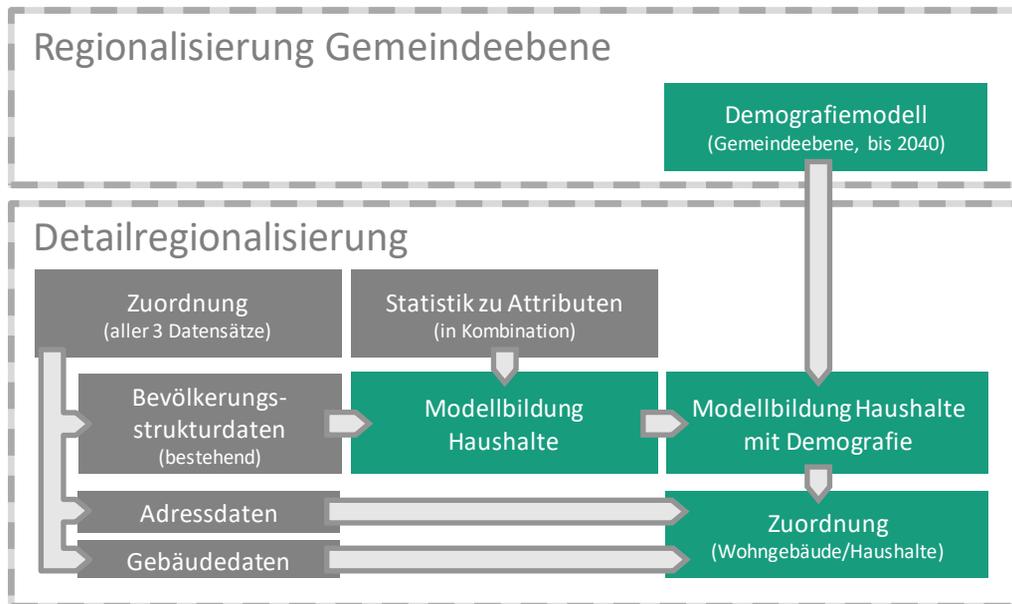


Abbildung 2: Regionalisierung Bevölkerungsstruktur

3.3.1 Synthetische Bevölkerung eines Straßenabschnittes

Mit den Daten der GfK Geomarketing zur Bevölkerungsstruktur [86] liegt ein Datensatz vor, der zahlreiche sozioökonomische Attribute auf Straßenabschnittsebene ausweist. Ein Straßenabschnitt umfasst dabei alle Haushalte in Gebäuden, die an einer Straße zwischen den nächsten Straßenkreuzungen liegen. Die Attribute beinhalten dabei insbesondere Angaben zum Haushaltseinkommen und dem Haushaltstyp (Ein- oder Mehrpersonenhaushalt mit oder ohne Kinder), bei denen ein Einfluss auf das Kaufverhalten plausibel erscheint, vergleiche [88; 89]. Der Datensatz erscheint damit bezogen auf den Umfang und das Betrachtungsgebiet (ganz Deutschland) geeignet, die in Kapitel 3.1.1 genannten Anforderungen zu erfüllen, nicht jedoch in Bezug auf die Auflösung: Eine Zuordnung der Haushalte nur in Gruppen für einen ganzen Straßenabschnitt reicht hier für die Anwendung der Modellergebnisse in Netzberechnungen (siehe Kapitel 1.2) nicht aus. Zielsetzung ist, die Attribute, die auf Straßenabschnittsebene in [86] nur als Summe vorliegen, in konkrete Kombinationen für Einzelhaushalte umzuwandeln. Als wichtige Einflussfaktoren für die Kaufentscheidung eines Elektrofahrzeugs sollen insbesondere der Haushaltstyp und das Einkommen plausibel kombiniert werden. Es ergibt sich damit die folgende Tabelle (als Beispiel für einen Straßenabschnitt), bei der die Randsummen Y_1 bis Y_3 und X_1 bis X_3 bekannt sind, und die farblich markierten Kombinationen gesucht werden:

Tabelle 2: Randsummen der sozioökonomischen Attribute [74]

	unter 2000 €	2000 bis 4000 €	über 4000 €	Summe
Single	?	?	?	X_1
Mehrpersonenhaushalt mit Kind	?	?	?	X_2
Mehrpersonenhaushalt ohne Kind	?	?	?	X_3
Summe	Y_1	Y_2	Y_3	

Unterbestimmtes
Problem

Die gesuchten Kombinationen sind dabei nicht durch die Randsummen eindeutig bestimmt. Gleichwohl erscheinen einige Kombinationen plausibler als andere, weil bspw. ein Singlehaushalt durchschnittlich ein geringeres Haushaltseinkommen zur Verfügung hat, wie eine bundesweite Stichprobe zeigt [92].

Einleitung Iterative-
Proportional-
Fitting-Algorithmus

Diese Statistik kann durch einen IPF mit der Information der Randsummen zusammengeführt werden, wie vergleichbar schon 1996 von BECKMANN ET AL. [93] gezeigt wurde. Bei der Anwendung des IPF werden dabei die gesuchten Werte „iterativ so angepasst, dass die bekannten Randsummen getroffen werden und die Verhältnisse der bekannten Stichprobe bestmöglich erhalten bleiben“ [74], was im Folgenden im Detail erläutert wird.

Vergleichs-
stichprobe

Die genannte Stichprobe ist in diesem Fall eine Vergleichsstichprobe auf Bundesebene [92]. Die in der Quelle in mehr Gruppen aufgeteilte Anteile werden zunächst in drei Gruppen je nach Einkommen und drei Gruppen von Haushaltstypen zusammengefasst, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3: Vergleichsstichprobe auf Bundesebene, gruppierte Werte aus [92]

	unter 2000 €	2000 bis 4000 €	über 4000 €
Single	10.598	4.689	539
Mehrpersonenhaushalt mit Kind	2.242	4.678	3.069
Mehrpersonenhaushalt ohne Kind	5.781	20.484	13.286

Hinweis: Ob die Gruppengrenzen (2000 € und 4000 €) jeweils der darüber- oder darunterliegenden Gruppe zugerechnet werden (ab 4000 € vs. über 4000 €), unterscheidet sich bei diesem und den folgenden betrachteten Datensätzen. Der Einfluss, welcher Gruppe der Einzelwert zugerechnet wird, ist von der Auswirkung allerdings zu vernachlässigen, und wird nicht weiter differenziert. Aus Darstellungsgründen wird auch die Benennung, beispielsweise in Spaltenüberschriften, vereinheitlicht.

Stichprobe vs.
Randsummen

Dieser bundesweite Durchschnitt widerspricht allerdings – auch prozentual – den Randsummen in den jeweiligen Straßenabschnitten, siehe Beispiel in Tabelle 4.

Tabelle 4: Beispiele für Randsummen eines Straßenabschnittes

	unter 2000 €	2000 bis 4000 €	über 4000 €	Summe
Single				$X_1 = 6$
Mehrpersonenhaushalt mit Kind				$X_2 = 5$
Mehrpersonenhaushalt ohne Kind				$X_3 = 3$
Summe	$Y_1 = 4$	$Y_2 = 6$	$Y_3 = 4$	14

In dem Verfahren werden nun iterativ folgende Schritte durchgeführt (vgl. [94]):

1. Die Vergleichsstichprobe ist die Startmatrix N^0 mit den Einträgen $n_{i,j}^0$ in den Zeilen i und den Spalten j , siehe Tabelle 3. Beispiel: $n_{1,2}^0 = 4.689$.
2. Anpassung der Matrix durch Multiplikationen, zeilenweise, Iterationsschritt $t = 1, 3, 5, \dots$:

- a. Anteil des Eintrags an der Zeilensumme:

Es wird für den Iterationsschritt t der Anteil des bisherigen Eintrages der Matrix N an der Summe der Zeile i gebildet:

$$\frac{n_{i,j}^{t-1}}{\sum n_i^{t-1}} \quad (2)$$

Dieser Anteil ändert sich in jedem Iterationsschritt und beträgt in diesem Beispiel für den zweiten Eintrag $j = 2$ der ersten Zeile $i = 1$ im ersten Iterationsschritt $t = 1$:

$$\frac{n_{1,2}^0}{\sum n_1^0} = \frac{4.689}{10.598 + 4.689 + 539} \approx 0,296 \quad (3)$$

- b. Multiplikation der Matrixeinträge:

Der neue Matrixeintrag bestimmt sich durch Multiplikation des Anteils aus Schritt a mit der Randsumme der jeweiligen Zeile X_i :

$$n_{i,j}^t = \frac{n_{i,j}^{t-1}}{\sum n_i^{t-1}} \times X_i \quad (4)$$

In diesem Beispiel ergibt sich der Eintrag der ersten Zeile und zweiten Spalte für den ersten Iterationsschritt:

$$n_{1,2}^1 = \frac{n_{1,2}^0}{\sum n_1^0} \times X_1 \approx 0,296 \times 6 \approx 1,778 \quad (5)$$

Nach der zeilenweisen Anpassung entspricht die Matrix N^t genau den vorgegebenen Randsummen jeder Zeile aus Tabelle 4, verletzt aber gegebenenfalls die Vorgabe der spaltenweisen Randsummen Y_j .

3. Anpassung der Matrix durch Multiplikationen, spaltenweise, Iterationsschritt $t = 2, 4, 6, \dots$:

a. Anteil des Eintrags an der Spaltensumme:

Es wird für den Iterationsschritt t der Anteil des bisherigen Eintrages der Matrix N an der Summe der Spalte j gebildet:

$$\frac{n_{i,j}^{t-1}}{\sum n_j^{t-1}} \quad (6)$$

Dieser Anteil ändert sich in jedem Iterationsschritt und beträgt in diesem Beispiel für den ersten Eintrag $i = 1$ der zweiten Spalte $j = 2$ im Iterationsschritt $t = 2$:

$$\frac{n_{1,2}^1}{\sum n_2^1} = \frac{1,778}{1,778 + 2,342 + 1,554} \approx 0,313 \quad (7)$$

b. Multiplikation der Matrixeinträge:

Der neue Matrixeintrag bestimmt sich durch Multiplikation des Anteils aus Schritt a mit der Randsumme der jeweiligen Spalte Y_j aus Tabelle 4:

$$n_{i,j}^t = \frac{n_{i,j}^{t-1}}{\sum n_j^{t-1}} \times Y_j \quad (8)$$

In diesem Beispiel ergibt sich der Eintrag der ersten Zeile und zweiten Spalte für den Iterationsschritt $t = 2$:

$$n_{1,2}^2 = \frac{n_{1,2}^1}{\sum n_2^1} \times Y_2 \approx 0,313 \times 6 = 1,880 \quad (9)$$

Nach der spaltenweisen Anpassung entspricht die spaltenweise Summe der Matrix N^0 genau den vorgegebenen Randsummen jeder Spalte aus Tabelle 4, verletzt aber gegebenenfalls wiederum die Vorgabe der zeilenweisen Randsummen X_j . So ergibt sich nach dem Iterationsschritt $t = 2$ die folgende Tabelle:

Tabelle 5: IPF, Matrix nach dem zweiten Iterationsschritt

	unter 2000 €	2000 bis 4000 €	über 4000 €	Summe
Single	2,881	1,880	0,297	5,059
Mehrpersonen- haushalt mit Kind	0,805	2,477	2,236	5,517
Mehrpersonen- haushalt ohne Kind	0,314	1,643	1,467	3,424
Summe	4	6	4	14

4. Prüfung:

Es wird geprüft, ob die Zeilensummen und Spaltensummen der Vorgabe der Randsummen (siehe Tabelle 4) entsprechen. Tun sie es nicht, werden die Schritte 2, 3 und 4 wiederholt. Nach der zeilenweisen Anpassung aus dem Schritt 2 entspricht die zeilenweise Summe genau den vorgegebenen Randsummen jeder Zeile, verletzt aber gegebenenfalls die spaltenweisen Randsummen und umgekehrt [94]. Bei wiederholter Durchführung dieser Anpassungen konvergiert das Verfahren jedoch [94].

Nach der Durchführung des IPF werden die bestimmten Matrixeinträge in einem Rundungsverfahren angepasst, um immer ganze Zahlen zu bestimmen [74], vergleiche auch [95]. In dem Rundungsverfahren wird dabei wiederum iterativ bei dem Wert mit dem geringsten Abstand zu einer ganzen Zahl begonnen, dieser wird gerundet. Der Rundungsrest wird auf die anderen Matrix-Einträge aufgeteilt, sodass die Summe der Matrix N übereinstimmt mit der Summe der Matrix vor dem Rundungsschritt. Dies wird wiederholt, bis die Matrix ganze Zahlen aufweist. Matrixeinträge, die durch die Randsummen eindeutig bestimmt sind, werden dabei nicht verändert und aus der Untersuchung des geringsten Abstands ausgeschlossen [74].

Das Attribut, welches Geschlecht der Haupteinkommensbezieher bzw. die Haupteinkommensbezieherin des Haushalts hat, kann anschließend mit gewichteter Zufallsverteilung (ohne Zurücklegen des gezogenen Haushalts) zugeordnet werden [74]. Ebenfalls kann den Haushalten entsprechend des Haushaltstyps (s.o.), einer unterschiedlichen Wahrscheinlichkeit von Personenanzahlen in Mehrpersonenhaushalten [96] und der Gesamteinwohnerzahl eines Straßenabschnittes [86] eine Personenanzahl zugeordnet werden [74]. Für eine genauere Analyse des Verfahrens sei auf CYGANSKI ET AL. verwiesen, die auf die „Möglichkeiten und Grenzen“ der Generierung synthetischer Bevölkerungen vertieft eingehen [97]. CYGANSKI ist auch Co-Autorin bei dem von SCHMIDT ET AL. veröffentlichten Methodenvergleich, in dem – unter anderem – auch ein IPF bezogen auf die Fragestellung der Aufteilung von Randsummen betrachtet wird [98].

Es lässt sich festhalten, dass mit Hilfe eines iterativen Zuteilungsalgorithmus aus einem Datensatz mit Attributen, die nur als Randsummen auf einer übergreifenden Ebene (in dem Fall Straßenabschnitten) vorliegen, und einer Stichprobe mit bekannter Kombination dieser Attribute ein Datensatz auf feiner aufgelöster Ebene (in dem Fall einzelne Haushalte) generiert werden kann. Anhand des IPF,

Nachfolgende
Zuordnungen

Zusammenfassung
synthetische
Bevölkerung

kombiniert mit verschiedenen Datenquellen und der anschließenden gewichteten Zuteilung weiterer Attribute werden damit Haushaltsdaten für das Jahr 2017 generiert, für die die folgenden Attribute bestimmt sind:

- Haushaltstyp
- Einkommensklasse
- Personenanzahl
- Haushaltsvorstand

3.3.2 Demografischer Wandel und Verortung der Bevölkerung

Mit der Methodik aus dem vorhergehenden Kapitel 3.3.1 steht damit eine Auswahl von Einzelhaushalten zur Verfügung, die einem Straßenabschnitt zugeordnet sind. Für die Grundlage der Elektrofahrzeug- und Ladestellenmodellierung fehlen jedoch noch zwei Schritte:

- die Zusammenführung mit dem demografischen Wandel aus Kapitel 3.1
- die Verortung der Haushalte in spezifische Gebäude

Verknüpfung der Datensätze

Aus der Methodik für den demografischen Wandel ist auf Gemeindeebene die Zunahme oder Abnahme von Personen je Alter und Geschlecht bekannt. Diese personenspezifische Zu- und Abnahme muss übertragen werden auf eine Zu- oder Abnahme von Haushalten, wobei diese Haushaltsänderung attributsspezifisch sein muss. Dies geschieht durch die Verknüpfung beider Datengrundlagen über das Alter des Haushaltsvorstandes, wie in [74] beschrieben.

Netto Zu- oder Abnahme

Nach der Verknüpfung können basierend auf den Kombinationen der Attribute der abnehmenden Haushalte nun (gleichverteilt) zufällig Haushalte entfernt werden. Sofern gleichzeitig für anderen Attributs-Kombinationen eine Zunahme modelliert wurde, können die Haushalte direkt im entsprechenden Straßenabschnitt ersetzt werden. Übersteigt die Zunahme insgesamt die Abnahme – wird also durch die Modellierung des demografischen Wandels ein Netto-Wachstum für die Gemeinde angenommen – werden diese Haushalte auf Straßenabschnitte verteilt [74].

Lokale Daten

Liegen Informationen darüber vor, in welchen Gebieten eine Haushalts-Zunahme absehbar ist, können diese Haushalte räumlich differenziert zugeteilt werden. Dies kann beispielsweise der Fall sein mit der Verfügbarkeit von Daten zu Neubaugebieten, wie es in der Anwendung der Methodik für die Stadt Hamburg der Fall war [99]. Ansonsten erfolgt die Zuteilung gleichverteilt, also entsprechend der bisherigen Größe der Straßenabschnitte [74].

Als Zwischenschritt kann somit die *zukünftige* Bevölkerung jeweils auf Ebene eines Straßenabschnittes modelliert werden. Im Folgenden wird erklärt, wie diese Haushalte spezifischen Gebäuden zugeordnet werden können.

Zwischenergebnis
Straßenebene

Um den Straßenabschnitten Einzelgebäude zuzuordnen, können verschiedene Verfahren eingesetzt werden, einschließlich räumlicher Untersuchungen in Geoinformationssystemen (im Folgenden: GIS). HORST konnte in seinen Arbeiten jedoch zeigen, dass auch eine Zuordnung anhand eines Adressdatensatzes [100] mit einem String-Compare-Verfahren funktioniert, wenn mögliche Abweichungen der Schreibweise von Straßennamen über eine (zu minimierende) Levenshtein-Distanz berücksichtigt werden [23]. Diese Zuordnung über die Straßennamen und Hausnummern wurde auch in [13] aufgegriffen und hat den Vorteil geringer Berechnungszeiten, da aufwendige räumliche Abgleiche nicht benötigt werden.

Adresszuordnung
anhand
Levenshtein-Distanz

Den so bestimmten Gebäuden je Straßenabschnitt sollen anschließend Haushalte anhand der jeweiligen Wohnungsanzahl zugeordnet werden. Diese ist zunächst unbekannt und wird anhand der Gebäudevolumen ermittelt. Aufgrund der Grundfläche und Höhe der Gebäude aus einem 3D-Gebäudedatensatz [101], der auch eine Information über die Gebäudenutzung enthält, wird die Zuordnung vorgenommen, wobei die Kategorien Wohngebäude und Wohn- und Gewerbegebäude berücksichtigt werden. Mit der Annahme einer durchschnittlichen Geschosshöhe von 3 Metern (vergleiche [102]), den durchschnittlichen Wohnungsgrößen (differenziert nach Einfamilienhäusern und Mehrfamilienhäusern) [103] und der nur anteiligen Nutzung von Wohn- und Gewerbegebäuden lassen sich dabei Wohnungen den Gebäuden zuteilen [74]. In dem Verfahren werden die durchschnittlichen Wohnungsgrößen dabei zunächst als Startwert genutzt, die dann variiert werden, um die Zielmenge der Wohnungen bzw. Haushalte zu erreichen, die sich aus [86] ergibt.

Haushaltsanzahl
anhand
Gebäudevolumen

Als weiterer Zwischenschritt stehen damit also modellierte Wohnungen zur Verfügung, die konkreten Wohngebäuden (sowohl reinen Wohngebäuden als auch Wohn- und Gewerbegebäuden) zugeordnet sind, die wiederum einem Straßenabschnitt mit einer Gesamtmenge an Haushalten zugeordnet sind.

Zwischenschritt
punktgenaue
Wohnungen

Im letzten Schritt können diese Haushalte dann auf die einzelnen Wohngebäude aufgeteilt werden. Anhand von Statistiken des Statistischen Bundesamtes können dabei wahrscheinlichere Kombinationen der Attribute Wohngebäudetyp und Haushaltsgröße [104] berücksichtigt werden [74]. Somit wird den einzelnen Haushalten automatisch auch als weiteres Attribut der Gebäudetyp hinzugefügt: Reine Wohngebäude, unterschieden in Ein-, Zwei-, und Mehrfamilienhäuser,

Haushaltszuteilung

außerdem noch Wohn- und Gewerbegebäude. Der Ablauf der Methodik ist zusammenfassend in Abbildung 3 dargestellt:

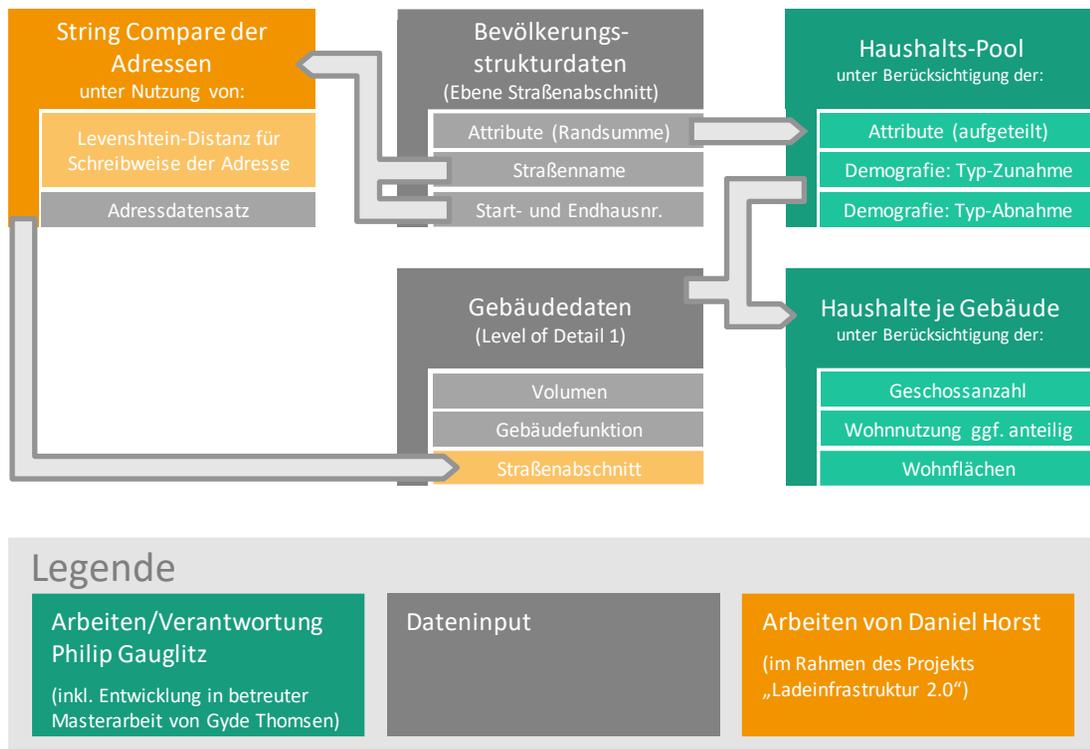


Abbildung 3: Zuordnung von Haushalten zu Gebäuden

Zusammenfassend weisen die so erzeugten synthetischen Haushalte damit die folgenden Merkmale auf:

- Die sozioökonomischen Attribute aus [86] werden unter Berücksichtigung typischer Kombinationen [92] übernommen.
- Sie sind über die Gebäudedaten [101] und Adressdaten [100] einem geografischen Punkt zugeordnet.
- Der gemeindespezifische demografische Wandel wird berücksichtigt (Kapitel 3.1 und 3.3.1).
- Sie weisen über die zugeordneten Gebäudedaten zudem den Gebäudetyp als weiteres Attribut auf.

3.3.3 Validierung der Bevölkerungsverteilung

Die Modellierung der synthetischen Bevölkerung erfolgt in zahlreichen Zwischenschritten und sollte deswegen validiert werden. Die Modellergebnisse können dafür mit den Zensusdaten verglichen werden, die als indirekte Raumgröße im 100m-Raster vorliegen. Als indirekte Raumgröße eignen sich die Zensusdaten selbst damit zwar nicht für die Verwendung in der Modellierung, durch die

empirischen Daten und die relativ hohe Auflösung stellen sie aber einen Referenzwert dar. Auch die Einflüsse der räumlichen Auflösung, der Betrachtung von Neubaugebieten und der Wohnraummodellierung können über einen paarweisen Vergleich unterschiedlicher Datensätze genauer untersucht werden. Dafür werden die folgenden Datensätze im paarweisen Korrelationsvergleich analysiert, Punktdaten werden dafür im selben Raster wie die Zensusdaten summiert und Rasterzellen werden nur dann berücksichtigt, wenn einer der Datensätze einen Eintrag größer null besitzt:

- a. die Zensusdaten im 100 m x 100 m-Raster [105]
- b. Bevölkerungsstrukturdaten der GfK, straßenzugsscharf [86]
- c. die synthetische Bevölkerung entsprechend Kapitel 3.3.2
- d. eine punktgenaue Verteilung ähnlich zu c, jedoch ohne Berücksichtigung der Gebäudevolumina und Neubaugebiete, bei der auf jedes Gebäude in einem Straßenzug die Einwohner des Straßenzugs gleichmäßig verteilt werden

Datensätze für
Korrelations-
vergleich

Dabei werden die folgenden Hypothesen aufgestellt:

Hypothesen
Bevölkerungs-
verteilung

1. Da alle Daten zur Bevölkerungsverteilung denselben Sachverhalt darstellen, sind alle Korrelationen positiv:

$$r_{x,y} > 0 \text{ für alle } x, y$$

2. Aufgrund der höheren Auflösung und damit genaueren Verteilung weisen die Verteilungen auf einzelne Häuser eine höhere Korrelation zum Zensusdatensatz auf als die GfK-Daten zum Zensusdatensatz:

$$r_{a,c} > r_{a,b} \text{ und } r_{a,d} > r_{a,b}$$

3. Eine Verteilung unter Berücksichtigung der Gebäudevolumina weist eine höhere Korrelation zum Zensusdatensatz auf als eine Verteilung ohne Berücksichtigung dieser. Die gegebenenfalls gegenläufige Berücksichtigung der Neubaugebiete im Datensatz c hat dabei einen zu geringen Einfluss, um diesen Effekt aufzuheben:

$$r_{a,c} > r_{a,d}$$

4. Die gebäudegenauen Verteilungen weisen aufgrund ihrer Auflösung und der ähnlichen Methodik eine höhere Korrelation untereinander auf als zu beiden anderen Datenverteilungen:

$$r_{c,d} > r_{a,c} \text{ und } r_{c,d} > r_{a,d} \text{ und } r_{c,d} > r_{b,c} \text{ und } r_{c,d} > r_{b,d}$$

Können die Hypothesen bestätigt werden, wäre das ein Hinweis auf die Validität der Verfahren und Ergebnisse. Mit den so erzeugten Haushalten stünde dann ein zentraler Baustein für die Erzeugung von räumlich hochaufgelösten Szenarien von Ladestellen zur Verfügung.

3.4 Detailregionalisierung: Heimpladen

Mit den punktgenauen, synthetischen Haushalten aus Kapitel 3.3 kann nun bestimmt werden, für welche Haushalte der Kauf eines Elektrofahrzeugs – und im zweiten Schritt die mögliche Anschaffung einer Ladestelle – wahrscheinlich erscheint.

Bestehendes Paper
und Masterarbeit

Die in diesem Kapitel vorgestellten Themen sind teilweise vom Autor im Artikel „Modeling Spatial Charging Demands Related to Electric Vehicles for Power Grid Planning Applications“ veröffentlicht [13] und werden teilweise in der Masterarbeit von THOMSEN [74], die fachlich vom Autor betreut wurde, behandelt.

Bestehendes Paper und Masterarbeit

Thematische
Kapiteleinleitung

Unterschiedliche Untersuchungen zeigen den Zusammenhang auf zwischen verschiedenen sozioökonomischen Attributen (wie zum Beispiel dem Einkommen, dem Geschlecht des Käufers/der Käuferin und dem Haushaltstyp) und der Häufigkeit, ein Elektrofahrzeug zu kaufen. So werden Elektrofahrzeuge beispielweise überdurchschnittlich häufig in Haushalten mit hohem Einkommen gekauft [88; 106]. Es gilt nun, aus diesen Zusammenhängen eine konkrete Methodik zur Verteilung von Elektrofahrzeugen und Ladestellen abzuleiten.

Zielsetzung des
Kapitels

Die Zielsetzung ist dabei eine hohe räumliche Auflösung zu erreichen, den demografischen Wandel zu berücksichtigen und die Methodik so zu gestalten, dass sie für die Generierung unterschiedlicher (räumlich-zeitlicher) Szenarien genutzt werden kann.

Struktur des
Kapitels

Im Kapitel 3.4.1 wird dafür zunächst untersucht, welche Attribute für die Verteilung von Elektrofahrzeugen und Ladestellen relevant sind und wie sie gewichtet werden können. Aufbauend darauf wird mit einer gewichteten Zufallsziehung die räumliche Verteilungen von Elektrofahrzeugen und Ladestellen generiert, siehe Kapitel 3.4.2. Dabei wird ebenfalls betrachtet, welchen Beitrag eine Sensitivitätsanalyse für die Modellvalidierung leistet.

3.4.1 Auswahl der Merkmale für die Verteilung

Aus den sozioökonomischen Attributen müssen diejenigen ausgewählt werden, die in der Modellierung als Effekt abgebildet werden sollen. Zudem muss eine Grundlage geschaffen werden für die anschließende Quantifizierung. Dafür wird die folgende Literaturanalyse durchgeführt.

Der Ergebnisbericht von KUHNNIMHOF UND NOBIS zur Studie „Mobilität in Deutschland“ (im Folgenden: MiD) von 2017 behandelt unterschiedlichste Aspekte der Mobilität, und untersucht auch quantitativ die Elektromobilität in Deutschland [89]. Folgende Studienergebnisse sind in diesem Kontext relevant:

Literaturanalyse

- In allen Altersklassen hat das Auto einen hohen Anteil am Modal Split (Anteil eines Verkehrsmittels an den Gesamtwegen), auch wenn er über die Altersklassen etwas variiert. Insbesondere die absolute Gesamtstrecke ist stark altersabhängig. Die Fahrstrecke ist zudem vom Geschlecht abhängig: Männer fahren nach der Untersuchung im Schnitt mehr Auto.
- Von allen Pkw aus Privathaushalten, ohne Berücksichtigung der Antriebsart, stehen 75 % zum Parken auf privaten Grundstücken. Bei Elektrofahrzeugen sind es mit 92 % deutlich mehr. KUHNNIMHOF UND NOBIS schreiben dazu: „Dieser hohe Anteil ist verständlich, da Elektroautos vor allem für Nutzer interessant sind, die eine private Lademöglichkeit zuhause haben.“
- „Bei drei Vierteln der Elektroautos gibt es weitere Pkw im Haushalt“, im Bundesdurchschnitt für alle Fahrzeuge ist das im Gegensatz dazu nur in rund der Hälfte der Fälle so.

Bei einer Umfrage des BDEW wird festgestellt: „Fast zwei Drittel der Befragten würden ein E-Fahrzeug am liebsten zuhause laden, [...]“ [6].

Bei einer Untersuchung von FRENZEL ET AL. werden umfangreich Erstnutzer der Elektromobilität untersucht [88], insbesondere werden auch das Haushaltseinkommen und der Haushaltstyp adressiert:

- Das monatliche Haushaltsnettoeinkommen liegt bei 10 % der privaten Nutzer bei bis zu 2000 €, bei 46 % über 2000 € bis 4000 € und bei 44 % über 4000 €.
- 11 % der Haushalte von Erstnutzern von Elektrofahrzeugen sind Singlehaushalte, 39 % sind 2-Personenhaushalte, 50 % Drei- oder Mehrpersonenhaushalte; im überwiegende Teil der Haushalte (61 %) leben dabei keine Kinder (unter 18 Jahren).

Zusammenfassend schreiben FRENZEL ET AL.: „Die privaten Elektrofahrzeugnutzer sind vorwiegend männlich, verfügen über hohe Bildungsabschlüsse und haben ein relativ hohes Einkommen.“ [88]

Eine vergleichbare Analyse wurde in [106] vom Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim deutschen Bundestag durchgeführt, dort wurden die sozioökonomischen Aspekte der „early adopters“ von Elektromobilität unter Verweis auf die Untersuchung von WIETSCHER ET AL. [107] wie folgt charakterisiert: „wohnen eher in ländlichen Gebieten oder Vorstädten; überwiegend Männer mittleren Alters, höherer Bildung und Einkommen, technische Berufe, Mehrpersonenhaushalt“ [106].

Ableitung relevante Attribute

Folgende Erkenntnisse sind damit aus den vier vorhergenannten Studien [6; 88; 89; 106] ableitbar:

- Die Attribute Haushaltstyp, Gebäudetyp, Geschlecht des Käufers/der Käuferin und Haushaltseinkommen sind relevant für den Elektrofahrzeug- und Ladestellenbesitz.
- Auch die Fahrstrecken hängen statistisch deutlich von sozioökonomischen Faktoren ab. Sie sind dabei nicht unbedingt direkt gekoppelt an die Frage der räumlichen Verortung von Ladestellen – der Kernfragestellung der vorliegenden Arbeit – wohl aber an die Frage von genutztem Ladestrom über den Zeitverlauf und damit relevant für die adressierte Anwendung der Arbeit für die Netzberechnung (vergleiche Kapitel 1.4).

Damit sollten die vorhergenannten Attribute für die Regionalisierung nutzbar gemacht werden. Zudem sollten diese Attribute über die Regionalisierung hinaus datentechnisch mitgeführt werden, um sie für die weitere mögliche Nutzung verfügbar zu machen. Beispielsweise können sie genutzt werden, um Ladezeitreihen passgenau mit den Ladestellen zu verknüpfen.

3.4.2 Generierung der räumlichen Verteilung

Die im vorhergehenden Kapitel genannten sozioökonomischen Attribute sind in einem einheitlichen Verfahren für die Zuteilung von Elektrofahrzeugen und Ladestellen nutzbar zu machen. Dabei müssen die statistischen Aussagen zu Elektrofahrzeugnutzern aus [88; 89] im Kontext des allgemeinen Durchschnitts betrachtet werden, ein Vergleich mit den Bevölkerungsstrukturdaten aus [86] für die Attribute Haushaltstyp und Haushaltseinkommen ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 6: Sozioökonomik Elektrofahrzeugkäufer:in [88] u. Durchschnitt [86]

Attribut	Ausprägung	Erstnutzer:innen Elektrofahrzeug ¹	Durchschnitt ²
Haushaltstyp	Single	11 %	38 %
	Mehrpersonen- haushalt ohne Kind	50 %	30 %
	Mehrpersonen- haushalt mit Kind	39 %	32 %
Einkommen	<2000 €	10 %	37 %
	2000-4000€	46 %	37 %
	>4000 €	44 %	26 %

¹ [88], bezieht sich auf den/die Fahrzeugnutzer:in, also die Person

² [86], bezieht sich auf Haushalte

Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Auswertung von FRENZEL ET AL. auf die einzelnen Nutzer bezieht [88], die Bevölkerungsstrukturdaten der GfK auf die Haushalte [86]. Zudem sei anzumerken, dass aus den Merkmalen nicht streng mathematisch Wahrscheinlichkeiten für einen Elektrofahrzeugkauf ableitbar sind, insbesondere, da Szenarien abgebildet werden, es also um potentielle Anschaffungen in der Zukunft geht. Die statistischen Aussagen sind damit in den Dateninput für die Szenarienbildung zu übersetzen. THOMSEN stellt in [74] vor, wie aus den sozioökonomischen Attributen eine Gewichtung analog zu einer Nutzwertanalyse gebildet werden kann und verweist dabei auf die Arbeit von KÜHNAPFEL [108]. THOMSEN stellt eine quantifizierte Gewichtung der Attribute (in [74]: „Merkmale“) und Bewertungen für die entsprechenden Ausprägungen (in [74]: „Merkmalsausprägungen“) in einer Tabelle vor. Analog dazu wurde von ihr und dem Autor der vorliegenden Arbeit in einer gemeinsamen Veröffentlichung [13] die Grundlage für eine Nutzwertanalyse entsprechend der folgenden Tabelle 7 vorgestellt, die auch für diese Arbeit übernommen wird. Dabei bekommen die vier betrachteten Attribute (engl. in [13]: „attributes“) unterschiedliche Gewichtungen („weightings“) zugewiesen. Jedes Attribut hat dabei zwei bis vier Ausprägungen („specifications“) mit unterschiedlichen Bewertungen („scores“). Die Bewertung ergibt sich dabei aus den vorhergenannten Arbeiten und statistischen Aussagen und die Gewichtung ergibt sich aus dem Diskurs im Projekt „Ladeinfrastruktur 2.0“.

Quantitative
Überführung der
Daten

Tabelle 7: Attribute und Ausprägungen nach [13]

Attribute	Gewichtung	Ausprägung	Bewertung
Haushaltstyp	15 %	Single	1
		Mehrpersonenhaus- halt ohne Kind	8
		Mehrpersonenhaus- halt mit Kind	6
Gebäudetyp	40 %	Einfamilienhaus	9
		Zweifamilienhaus	7
		Mehrfamilienhaus	1
		Wohn- und Gewerbe- gebäude	3
Haushaltseinkommen	40 %	<2000 €	1
		2000-4000€	5
		>4000 €	9
Geschlecht Hauptein- kommensbezieher:in	5 %	männlich	9
		weiblich	1

Rechenbeispiel
Gesamtbewertung

Für die Veranschaulichung sei folgendes Beispiel quantifiziert: Ein Mehrpersonehaushalt mit Kind (15 % x 6 = 0,9), der in einem Einfamilienhaus wohnt (40 % x 9 = 3,6), ein hohes Einkommen (40 % x 9 = 3,6) und eine weibliche Haupteinkommensbezieherin hat (5 % x 1 = 0,05), bekommt eine Gesamtbewertung von $0,9 + 3,6 + 3,6 + 0,05 = 8,15$. Zum Vergleich: Die durchschnittliche Bewertung für Haushalte in Hamburg liegt bei 3,52.

Nutzwertanalyse als
additives Verfahren

Während grundsätzlich verschiedenste Verfahren denkbar wären, um aus der Einzelbewertung verschiedener Ausprägungen eine attributsübergreifende Gesamtbewertung zu bilden, sprechen folgende Aspekte für eine additive Methode wie die der Nutzwertanalyse [13]:

- Eine multiplikative (faktorielle) Zusammenführung von Bewertungen würde sich insbesondere eignen, wenn Variablen zusammengeführt würden, die eindeutig statistisch unabhängig voneinander sind (vgl. [109]). Für die statistischen Aussagen zu den Haushaltsausprägungen ist das nicht gegeben, weswegen ein additives Verfahren geeigneter erscheint.
- Wie eingangs in diesem Kapitel erläutert, lassen sich keine direkten Wahrscheinlichkeiten einer Kaufentscheidung aus den Ausprägungen ableiten. Eine direkte Wahrscheinlichkeit wäre zum Beispiel: ‚Herr Mustermann wird sich im Jahr 2030 zu 7 % ein Elektrofahrzeug kaufen‘. Es geht vielmehr um einen relativen Vergleich unterschiedlicher Möglichkeiten, näm-

lich der Auswahl unterschiedlicher Haushalte. Dies entspricht der Anwendung, für die die Nutzwertanalyse angewandt werden kann. (vergleiche [74; 108]).

Bezogen auf die quantifizierten Gewichtungen und Bewertungen der Tabelle 7 ist darüber hinaus Folgendes zu beachten:

- Kern der vorliegenden Arbeit sind nicht die genauen Zahlenwerte aus Tabelle 7, sondern ist im Gegenteil die Flexibilität, diese bei neuen Erkenntnissen anzupassen.
- Neben der Anpassung bei neuen Erkenntnissen können die Gewichtungen insbesondere auch genutzt werden, um Szenarienvarianten zu bilden. Das kann beispielsweise ein Szenario sein, bei dem durch andere Förderinstrumente und gesunkene Anschaffungskosten für Elektrofahrzeuge das Einkommen eine weniger starke Rolle spielt. Zudem kann anhand von Sensitivitätsanalysen die Abhängigkeitsstärke der räumlichen Ergebnisse von den einzelnen Gewichtungen untersucht werden, wie es THOMSEN in ihrer Arbeit macht [74].
- Die zu erstellenden Szenarien von räumlich verteilten Fahrzeugen und Ladestellen bilden einen Hochlauf ab, der sich über einen Zeitraum erstreckt. Die Nutzung von zukünftigen Bevölkerungsverteilungen und einheitlichen – nicht über die Zeit des Zubaus angepassten – Gewichtungen stellt insofern eine Vereinfachung dar.

Zusammenfassend kann mit der beschriebenen Nutzwertanalyse jedem Haushalt eine Gesamtbewertung zugewiesen werden, wobei eine höhere Punktzahl einen besseren Nutzwert darstellt. Allgemein ist das Verfahren der Nutzwertanalyse für den Vergleich mehrerer Handlungsalternativen untereinander gedacht. Im vorliegenden Fall soll jedoch nicht nur einmalig ein Elektrofahrzeug zugeteilt werden, sondern eine räumliche Verteilung zahlreicher Elektrofahrzeuge vorgenommen werden. Deswegen wird das Ergebnis der Nutzwertanalyse als relative Wahrscheinlichkeit (im Vergleich zu den Werten anderer Haushalte) interpretiert (siehe auch [13; 74]). Im oben genannten Beispiel mit 8,15 Bewertungspunkten für einen Mehrpersonenhaushalt mit Kind in einem Einfamilienhaus mit hohem Einkommen und einer weiblichen Haupteinkommensbezieherin ergibt sich damit eine rund 2,3-mal so hohe Wahrscheinlichkeit für ein zugeteiltes Elektrofahrzeug wie im durchschnittlichen Haushalt in Hamburg (mit einer Bewertung von rund 3,52).

Grenzen der
Nutzwertanalyse im
Anwendungsfall

Zusammenfassung
Nutzwertanalyse

Auf dieser Grundlage kann mit einer gewichteten Zufallsziehung eine räumliche Verteilung von Elektrofahrzeugen erstellt werden. In einem zweiten Schritt kann aus der Verteilung der Elektrofahrzeuge ausgewählt werden, welche Fahrzeug-Anschaffung mit einem Zubau einer Heimpladestelle einhergeht. Ist die Entscheidung für ein Elektrofahrzeug gefallen, erscheint weitestgehend nur noch der Platz, abbildbar über den Gebäudetyp, relevant für die Unterscheidung von einem Elektrofahrzeug mit oder ohne Heimpladestelle (vergleiche [6; 89]). Die Nutzwertanalyse für den zweiten Schritt beschränkt sich damit auf eine Gewichtung des einzigen Kriteriums Gebäudetyp. Im zweiten Schritt ist damit die Gewichtung des Gebäudetyps 100 % und die Bewertung beträgt 8 für Ein- und Zweifamilienhäuser und 2 für sonstige Gebäude.

Die Verteilungen von Elektrofahrzeugen und Ladestellen beinhalten damit die folgenden Eigenschaften:

- eine präzise Verortung anhand der Adresse
- eine Information über die Zugehörigkeit zu einem Haushalt, einem Gebäude, einem Straßenabschnitt und allen darüber gelagerten räumlichen Informationen wie der Gemeinde und dem Bundesland.
- über die Haushaltszugehörigkeit eine Berücksichtigung der sozioökonomischen Eigenschaften der Nutzer, die sowohl für die Auswahl der Verteilung verwendet wird, als auch die für eine weitere Modellierung – bspw. für die Zuordnung von Ladeprofilen – zur Verfügung steht.
- über die wiederholte Zufallsziehung eine Reihenfolge des Zubaus (bei der besser bewertete Haushalte mit höherer Wahrscheinlichkeit früher gezogen werden).
- Nutzung unterschiedlicher Szenarienannahmen:
 - Die Verteilungsmethode lässt sich auf unterschiedliche Rahmenzahlen anwenden.
 - Die Gewichtungen der sozioökonomischen Eigenschaften lassen sich variieren.
- Mit den gleichen Szenarienannahmen lassen sich stochastisch unterschiedliche Verteilungen generieren. Eine solche wiederholte Verteilung erscheint insbesondere sinnvoll im Hinblick auf probabilistische Netzrechnungen (vergleiche [7]).

- Über den Reihenfolgen-Ansatz ist eine Konsistenz konsekutiver Szenarien gegeben: Ein Standort einer Verteilung in einem frühen Szenario stimmt mit dem Standort in einem späteren Szenario überein (im Gegensatz zu einer Methode, wo ein frühes und spätes Szenario unabhängig stochastisch platziert werden).

Die Aspekte des in Kapitel 1.4 definierten Untersuchungsgegenstandes sind damit für die Modellierung der Heimladestellen erfüllt.

3.4.3 Validierung der Elektrofahrzeug-Eignung

Wie in Kapitel 1.5.2 erläutert, ist eine quantitative Validierung mit Vergleichsdaten für konkrete Ladestellenverteilungen allgemein nicht trivial und in dem hier vorliegenden Anwendungsfall auch nicht zielführend. Hilfreich ist ein quantitativer Abgleich allerdings durchaus für den vorgelagerten Schritt der Haushaltsbewertung im Hinblick auf die Elektrofahrzeug-Eignung: So lassen sich der modellierten Bewertung Vergleichsdaten gegenüberstellen, die zu der Bewertung einen Zusammenhang aufweisen müssten. Dafür eignen sich die Hamburger Stadtteilprofile [110], die für die geografische Verarbeitung zunächst mit Vektordateien der Stadtteilflächen aus OSM [111] verknüpft werden. Die Vektordateien werden dafür vorab entsprechend der Zusammenfassung aus [110] geografisch vereinigt, und Flächen von kleineren Inseln, die zu Hamburg gehören, entfernt. Die folgende Auswahl an Daten auf Stadtteilebene aus [110] wird genauer untersucht:

Hamburger
Stadtteilprofile als
Vergleichsgrößen

- Daten mit direktem Bezug zum Modellaufbau:
Diese Daten eignen sich, um anhand eines Vergleichs zu prüfen, ob das Modell technisch gesehen Ergebnisse erzeugt, die zu erwarten sind.
 - Anteil der Single-Haushalte
 - Anteil der Wohnungen in Ein- und Zweifamilienhäusern
- Daten ohne Bezug zum Modellaufbau, aber mit inhaltlichem Bezug zum beschriebenen Modelloutput:
Diese Daten eignen sich, um anhand eines Vergleichs zu prüfen, ob das Modell inhaltlich gesehen plausible Ergebnisse erzeugt.
 - Anzahl der Pkw je Haushalt
Nach der Analyse in Kapitel 3.4.1, siehe [89], werden Elektrofahrzeuge insbesondere in Haushalten mit mehreren Pkw gekauft.
 - Aktueller Anteil der Elektrofahrzeuge in den Stadtteilen.
Der bisherige Ausbau stellt keine verlässliche Validierungsgrundlage dar (siehe Kapitel 2.3), ist aber eine interessante Vergleichsgröße.

- Daten ohne Bezug zum Modellaufbau, aber mit vermutetem indirekten Bezug zum beschriebenen Modelloutput:

- Arbeitslosenquote in dem Stadtteil
Ein höherer Anteil an Arbeitslosigkeit könnte für einen weniger florierenden Stadtteil mit weniger Fokus auf Elektromobilität sprechen.

Stadtteile, für die eine oder mehrere der vorhergenannten Größen nicht in [110] angegeben sind oder nicht direkt aus der Quelle ermittelbar sind, werden für die nachfolgenden Untersuchungen nicht berücksichtigt. Dies betrifft die Stadtteile 'Moorburg und Altenwerder', 'Cranz', 'Francop', 'Spadenland', 'Tatenberg' und 'Reitbrook', die mit insgesamt 3.885 Einwohnern einen Anteil von rund 0,2 % der Einwohner Hamburgs ausmachen. Das Weglassen dieser Stadtteile für die Analyse ist aufgrund des geringen Bevölkerungsanteils unproblematisch.

Korrelationsanalyse:
Modell und
Stadtteildaten

Aus den punktgenauen Bewertungen der Haushalte werden Stadtteil-weite Durchschnittswerte gebildet. Diese Bewertungen werden mit dem Index ‚m‘ für ‚Modell‘ bezeichnet. Es werden die Korrelationen dieser Bewertungen mit den folgenden fünf Größen der Stadtteile gebildet:

- Anteil der Single-Haushalte
- Anteil der Wohnungen in Ein- und Zweifamilienhäusern
- Anzahl der Pkw je Haushalt
- Ist-Anteil der Elektrofahrzeuge
- Arbeitslosenquote

Hypothesen,
Teil I/II

Für die Korrelationsanalyse werden die folgenden Hypothesen aufgestellt:

- Da Single-Haushalte im Modellaufbau zu einer niedrigeren Bewertung und Ein- und Zweifamilienhäuser zu einer höheren Bewertung führen, sind die entsprechenden Zusammenhänge auch auf Stadtteile-Ebene nachweisbar:

$$r_{m,a} < 0 \quad \text{und} \quad r_{m,b} > 0$$

- Die Anzahl der Pkw je Haushalt und der bisherige Anteil der Elektrofahrzeuge weisen einen positiven Zusammenhang zu der im Modell bestimmten Bewertung auf:

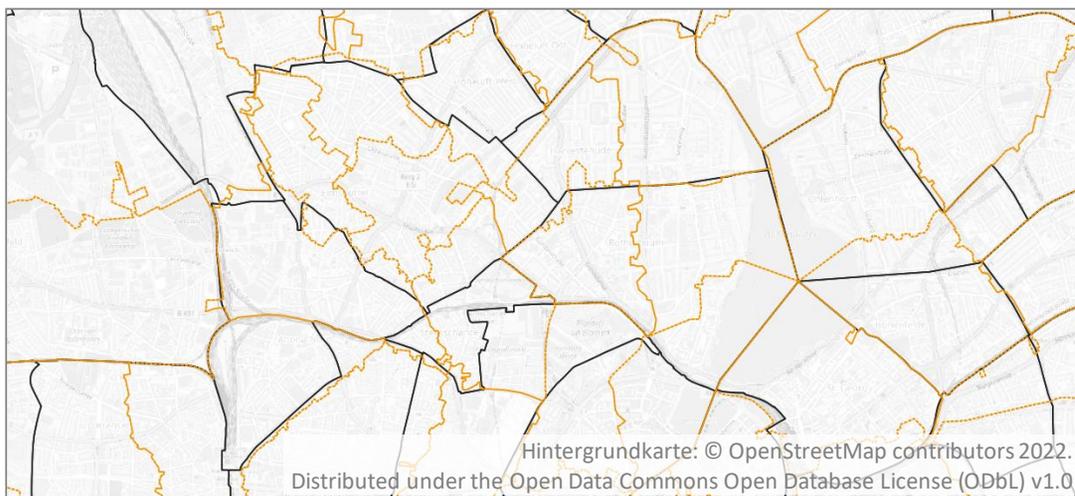
$$r_{m,c} > 0 \quad \text{und} \quad r_{m,d} > 0$$

3. Die Arbeitslosenquote weist einen negativen Zusammenhang zu der im Modell bestimmten Bewertung auf:

$$r_{m,e} < 0$$

Vergleichend werden zudem die Korrelationen von Daten eines alternativen Modells mit den Stadtteil-Daten a bis e gebildet: Die GfK Geomarketing modelliert die Affinität für Elektrofahrzeuge der Haushalte [112] aus Befragungen, und gibt sie als Index-Wert an, bei dem 100 ein durchschnittliches Interesse an Elektrofahrzeugen darstellt, und 150 beispielsweise ein um 50% überdurchschnittliches Interesse [113]. Der thematische Inhalt der Größe ist damit durchaus vergleichbar mit der Bewertung aus den Kapiteln 3.4.1 und 3.4.2, deren adressierter Anwendung allerdings nicht gleichzusetzen: So wird von der GfK zunächst das allgemeine Interesse abgebildet, aber keine konkrete Wahrscheinlichkeit für einen Elektrofahrzeug- oder Ladestellenkauf, zudem wird darauf hingewiesen, dass die Daten je nach Anwendungsfall auch mit Daten zu der Wohnsituation zu kombinieren sind [113]. Der Datensatz ist dabei auf Postleitzahlebene verfügbar, also als durchschnittlicher Index je Haushalt auf Postleitzahlebene. Er wird mit den geografischen Flächen der Postleitzahlgebiete aus OSM [114] verknüpft. Diese sind dabei weder deckungsgleich mit den Stadtteilen, noch sind sie Teilmengen davon, noch bilden sie Obermengen, siehe Abbildung 4.

Korrelationsanalyse:
Affinität
Elektrofahrzeuge
der GfK



-  Grenzen Stadtteile
-  Grenzen Postleitzahlgebiete

Abbildung 4: Stadtteile und Postleitzahlgebiete in Hamburg [110; 114; 115]

Übertragung von
Postleitzahlgebieten
auf Stadtteile

Eine direkte Übertragung von den Größen auf Postleitzahlebene auf die Stadtteile ist damit nicht möglich, es wird daher für die Übertragung eine weitere Größe benötigt. Dafür wird zunächst allen in Kapitel 3.3.2 erstellten Haushalten der Indexwert der Elektrofahrzeug-Affinität zugeteilt. Anschließend wird der Durchschnittswert auf Stadtteilebene gebildet, analog wie zuvor mit den eigenen Modelldaten verfahren wurde.

Hypothesen,
Teil II/II

Für die so erstellte Affinität für Elektrofahrzeuge auf Stadtteilebene wird die Korrelation zu den vorher genannten Datensätzen gebildet, also den Modelldaten ‚m‘ und den Daten auf Stadtteilprofile ‚a‘ bis ‚e‘ und es werden die folgenden Hypothesen aufgestellt:

4. Auch für die GfK-Daten stellt sich ein positiver Zusammenhang zu der Anzahl der Pkw je Haushalt und der Ist-Anzahl der Elektrofahrzeuge her:

$$r_{\text{GfK},c} > 0 \quad \text{und} \quad r_{\text{GfK},d} > 0$$

5. Aufgrund der detaillierteren Betrachtung in dem hier entwickelten Modell sind die jeweiligen Korrelationen damit größer als die Korrelationen mit den GfK-Daten:

$$r_{m,c} > r_{\text{GfK},c} \quad \text{und} \quad r_{m,d} > r_{\text{GfK},d}$$

6. Analog weist die Arbeitslosenquote auch zu den GfK-Daten einen negativen Zusammenhang auf, der gegensätzliche Zusammenhang zu dem hier entwickelten Modell ist jedoch stärker:

$$r_{\text{GfK},e} < 0 \quad \text{und} \quad r_{m,e} < r_{\text{GfK},e}$$

7. Da beide Modelle einen vergleichbaren Sachverhalt darstellen, haben sie eine positive Korrelation:

$$r_{\text{GfK},m} > 0$$

Gemeinsam mit den technischen Modelleigenschaften (Ende Kapitel 3.4.2), kann mit der Auswertung der Hypothesen eine Validität der Modelldaten für den hier dargestellten Anwendungsfall, also der Verwendung für die Wahrscheinlichkeit eines Elektrofahrzeugkaufs in Zukunft, untersucht werden.

3.5 Detailregionalisierung: (halb-) öffentliches Laden

Öffentlich zugängliche Ladestellen beinhalten sowohl Ladestellen im öffentlichen Raum (wie beispielsweise auf öffentlichen Parkplätzen im Straßenraum) als auch auf privaten Flächen, die aber öffentlich zugänglich sind (wie beispielsweise Supermarktparkplätze).

Die in diesem Kapitel vorgestellten Themen sind teilweise vom Autor im Artikel „Modeling public charging infrastructure considering points of interest and parking potentials“ veröffentlicht [14].

Bestehendes Paper

Bestehendes Paper

Der Aufbau eines ganzheitlichen Modells, das sowohl Heimladestellen als auch (halb-) öffentliche Ladestellen berücksichtigt, adressiert die in Kapitel 1.2 definierten Ziele, denn über die Berücksichtigung der verschiedenen Typen kann ein umfassendes Bild des zukünftigen Ausbaus von Ladestellen entstehen und bei dem Erkenntnisgewinn über zukünftige Herausforderungen helfen. Zudem ist der wechselseitige Ersatz von Ladestellen dieser unterschiedlichen Typen möglich, wie beispielsweise in [37] ausgeführt, da die Nutzung eines Ladestellentyps einen anderen in gewissem Maße ersetzen kann. Eine Modellierung von Szenarienvarianten mit unterschiedlichem Verhältnis von öffentlichen zu privaten Ladestellen erfordert deshalb eine zueinander konsistente Abbildung der unterschiedlichen Ladestellentypen.

Thematische
Kapiteleinleitung

Für die Regionalisierung von öffentlich zugänglichen Ladestellen besteht dabei ebenfalls – analog zu den Heimladestellen (siehe Kapitel 3.4) – die Notwendigkeit für eine genaue räumliche Verortung und die Berücksichtigung lokaler Begebenheiten. Weiteres Kernelement ist zudem die holistische Betrachtung der Ladestellentypen, bei denen die Verteilung von (fehlenden) Heimladestellen einen Einfluss auf die Ladestellenverteilung im (halb-) öffentlichen Raum hat.

Zielsetzung des
Kapitels

Dafür wird in Kapitel 3.5.1 zunächst untersucht, wie sich der Bedarf nach öffentlichen Ladestellen zusammensetzt, und welche Eingangsdaten für die Abbildung genutzt werden können. Diese punktgenau vorliegenden Bedarfe werden anschließend quantifiziert (siehe Kapitel 3.5.2), unter anderem anhand einer Analyse der Anfahrtshäufigkeiten bestimmter POI. Dem Bedarf nach Ladestellen steht das Potential in Form von Parkflächen gegenüber, das in Kapitel 3.5.3 untersucht wird. Aus diesen geografischen Datensätzen kann mit Hilfe einer Rasterrechnung eine Bewertung einzelner Parkplätze abgeleitet werden, die wiederum für die räumliche Verteilung (halb-) öffentlicher Ladestellen genutzt wird (siehe Kapitel 3.5.4). Anschließend wird ein Vergleich durchgeführt,

Struktur des
Kapitels

bei dem das hier entwickelte Modell, zwei vereinfachte Modelle und ein KI-Ansatz aus der Literatur miteinander verglichen werden. Dafür werden die räumlichen Ladebedarfe aller Verfahren in ein einheitliches Raster überführt. Die Rastereinträge werden danach für alle vier Verfahren paarweise miteinander verglichen, in dem der Korrelationskoeffizient zwischen je zwei Datensätzen gebildet wird. Die Aufstellung von Hypothesen zu diesen Korrelationen erlaubt die spätere Prüfung der Hypothesen und damit die Validierung des Modellschritts.

3.5.1 Modelleingangsgrößen: Bedarfe nach Ladestellen

Bedarf am Wohnort

Der Bedarf nach Ladestellen entsteht an den Start- und Zielorten von Fahrtwegen, also am Wohnort der Fahrzeugbesitzer und an verschiedenen Zielen, die mit einem Elektrofahrzeug angefahren werden. Bei der Modellierung vom Bedarf öffentlicher Lademöglichkeiten am Wohnort kommt der ganzheitliche Modellaufbau zum Tragen: Durch die Modellierung sowohl des Fahrzeug- als auch des Heimladestellenbesitzes, wie er in Kapitel 3.4 beschrieben ist, stehen andererseits auch diejenigen Fahrzeuge (einschließlich räumlicher Verortung) zur Verfügung, die eben keine Heimladestelle haben, und so einen Bedarf nach öffentlicher Ladeinfrastruktur bedingen.

OpenStreetMap
für Orte

Daneben kann ein Bedarf nach Ladestellen im öffentlichen Raum überall dort entstehen, wo sich Fahrziele befinden. Mögliche Fahrziele lassen sich über die POI aus OpenStreetMap [115] (im Folgenden: OSM) ableiten, die sowohl den geografischen Punkt (oder teilweise die flächige Ausdehnung eines POI) als auch den Typ benennen. Die von OSM umfassten Objekte sind dabei zahlreich und bedürfen für die praktische Anwendung einer mehrfachen Filterung bzw. Auswahl. Diese kann sowohl geografisch für das Anwendungsgebiet erfolgen, als auch über die „keys“ (Gruppen) und „tags“ (Spezifikationen) der OSM-Objekte. Bei flächigen POI aus OSM (bspw. für größere Gebäude wie Einkaufszentren oder Kirchen) ist eine Umwandlung in Punktdaten notwendig, was über die Bildung des Zentroiden möglich ist [14].

In der Abbildung 5 sind die verschiedenen punktförmigen Bedarfe schematisch dargestellt.



Abbildung 5: Schematische Darstellung der punktförmigen Bedarfe

Für eine Auswahl relevanter Fahrziele (und im zweiten Schritt damit die Bestimmung von relevanten keys und tags aus OSM) kann eine Auswertung von Fahrzielen aus der MiD-Studie herangezogen werden, in deren Umfrageauswertung mehr als 127.000 Wege in Deutschland berücksichtigt und kategorisiert sind [89]. Diese Dateneinträge können umfangreich gefiltert und gruppiert werden. Für den vorliegenden Anwendungsfall sind dabei insbesondere die Möglichkeiten relevant, nur Fahrten, die mit dem Auto zurückgelegt werden, zu berücksichtigen, nach der Größe der Gemeinde zu unterscheiden (bspw. nur Fahrten in Großstädten zu berücksichtigen), und den Wege-Typ (die zwei häufigsten Typen in der Umfrage sind beispielsweise „tägliches Bedarfe“ und „Besuch/Treffen von Bekannten“) zu differenzieren. Diese Daten ermöglichen damit, Häufigkeiten von Zielen, unterschieden nach der Gemeindegröße und spezifiziert für Autofahrten, zu analysieren. Sie sind zunächst von konkreten Orten unabhängig.

Die Wegeziele aus MiD können so nach Häufigkeit sortiert werden und für die häufigsten Fahrziele kann eine Entsprechung in den OSM-Daten gefunden werden, wie beispielsweise die OSM key: value-Kombination „shop: supermarket“ für die MiD-Kategorie „tägliches Bedarfe“, wie vom Autor in [14] vorgestellt wurde.

Anfahrtsfrequenz
anhand
Umfrageauswertung

Verknüpfung der
Datensätze

3.5.2 Bewertung der Bedarfe

Ansatz der
Bewertung

Analog zur Vorgehensweise bei den Heimladestellen wird für jeden geografischen Punkt nun eine Bewertung ermittelt, die den lokalen Bedarf für eine öffentliche Ladestelle angibt. Dabei ist der absolute Zahlenwert der Bewertung methodisch nicht relevant, sondern die relativen Unterschiede zwischen den einzelnen Bedarfen sind bestimmend für die später folgende Verteilung. Die Gesamtsumme der Bewertungen wird dabei im Sinne der Nachvollziehbarkeit so skaliert, dass sie der gewünschten Anzahl der öffentlichen Ladestellen in der jeweiligen Gemeinde gleicht.

Aufteilung der
Bewertung

Diese Bewertungspunkte werden zunächst auf die beiden Gruppen ‚Fahrzeuge ohne Heimlademöglichkeit‘ und ‚POI‘ aufgeteilt. Die Aufteilung erfolgt hier zu 50 % / 50 %, kann aber entsprechend des Modellansatzes je nach Szenario variiert werden. Die Aufteilung auf einzelne Fahrzeuge erfolgt entsprechend der Gesamtzahl der Fahrzeuge, jedes Fahrzeug ist dabei gleich gewichtet.

Bewertung der POI

Die Bewertungspunkte für POI werden auf einzelne Zielorte aufgeteilt, für deren Quantifizierung sich die MiD-Daten anbieten. Neben der Auswahl der zu berücksichtigten Ziele (siehe Kapitel 3.5.1) kann die Anzahl der Wege auch für eine Gewichtung der MiD-Wege-Typen genutzt werden [14]. Dies beinhaltet die Annahme, dass der Ladebedarf innerhalb eines Wege-Typs (bspw. täglicher Bedarf) proportional zur Anfahrtshäufigkeit steht, was plausibel erscheint, wenn man mögliche Standzeiten zunächst außer Acht lässt. Da für einen MiD-Wege-Typen mehrere OSM-Objekttypen identifiziert werden können, die sich qualitativ aber gegebenenfalls erheblich unterscheiden, erscheint es angemessen, in der Modellierung eine Möglichkeit zu schaffen, hier zu differenzieren (siehe beispielsweise ein großes Klinikum und eine einzelne Arztpraxis, welche jeweils ein OSM-Objekt sind und beide dem MiD-Wegeziel „Arztbesuch, andere medizinische Dienstleistungen“ zugeordnet werden). Dafür werden Größenklassen eingeführt, die wiederum unterschiedlich gewichtet werden können [14].

3.5.3 Modelleingangsgrößen: Parkflächenpotentiale

OSM als Quelle für
Parkflächen

Dem Bedarf nach öffentlichen Ladestellen steht das Potential in Form von Parkflächen gegenüber. In OSM sind verschiedene Formen von Informationen zu Parkflächen verfügbar, die jedoch einer Datenaufbereitung und das Füllen von Datenlücken benötigen, um sie für die vorliegende Modellierung nutzbar zu machen.

In der vorliegenden Arbeit werden dabei die folgenden Parkflächen berücksichtigt:

1. Parkflächen mit Information der geometrischen Fläche in OSM
2. Parkflächen ohne Information der geometrischen Fläche in OSM
3. Straßen mit Information über die Parkplatzsituation in OSM
4. Straßen ohne Information über die Parkplatzsituation in OSM

Die Methoden für die Aufbereitung oben genannter Parkflächen bis zur Verfügbarkeit von geometrischen Flächen wird im Folgenden beschrieben. Die Umwandlung in eine Information, die die Anzahl einzelner Parkplätze beinhaltet, wird in dem folgenden Kapitel 3.5.4 behandelt.

Parkflächen, deren Ausdehnung als geometrische Fläche bekannt ist, können direkt übernommen werden. Die Auswahl erfolgt – neben der geografischen Filterung für das Anwendungsgebiet – anhand der Keys und Values der OSM-Objekte, siehe Tabelle 8. Eine Vereinfachung ergibt sich dadurch, dass Parkplatzinterne Zuwege nicht modelliert bzw. nicht abgezogen werden. Diese Vereinfachung erscheint legitim: Eine größere Auswirkung ergibt sich erst bei weitgehender Nutzung des Potentials, also wenn der Parkplatz zum großen Teil mit Ladestellen gefüllt wäre. Dies erscheint gleichzeitig bei größeren Parkplätzen mit internen Zuwegen unwahrscheinlich.

Parkflächen als
geometrische Fläche

Tabelle 8: Keys/Values für Parkplätze, Teil 1 [14]

Key	Value
amenity	parking
parking	multi-storey; underground
building	parking; carport

Parkflächen, die auch als OSM-Objekt entsprechend der Key/Value-Kombinationen aus Tabelle 8 hinterlegt, aber als Punkt eingetragen sind, können – sofern die Information über eine Angabe der Parkplatzkapazität (OSM-Key „capacity“) gegeben ist – in eine Fläche umgewandelt werden. Dem Objekt wird eine Kreisfläche zugeordnet, dessen Fläche sich aus der Anzahl der Parkplätze $n_{\text{parkplätze}}$ und der Fläche eines einzelnen Parkplatzes $A_{\text{parkplatz}}$ zusammensetzt, womit sich der Radius bestimmen lässt (vergleiche [14]):

punktförmige
Parkflächen

$$r = \sqrt{\frac{A_{\text{parkplatz}} \times n_{\text{parkplätze}}}{\pi}} \quad (10)$$

Dabei kann die Fläche eines einzelnen Parkplatzes $A_{\text{parkplatz}}$ mit 15 m^2 angenommen werden [14; 116]. Ist keine Kapazitätsangabe vorhanden, bleibt das Objekt in diesem Prozessschritt punktförmig.

Linienförmige Objekte in OSM, die als Straßen klassifiziert sind, enthalten teilweise eine Information über die Parkplatzsituation. Dabei wird eine einseitige und beidseitige Parkmöglichkeit und die Ausrichtung der Parkbucht – senkrecht, parallel oder diagonal – unterschieden, siehe Tabelle 9.

Tabelle 9: Keys/Values für Parkplätze, Teil 2 [14]

Key	Value
parking:lane:left	parallel; diagonal; perpendicular
parking:lane:right	parallel; diagonal; perpendicular
parking:lane:both	parallel; diagonal; perpendicular

Für diese Straßen kann eine äquivalente Fläche entlang der Linie der Straßennitte bestimmt werden, die der Fläche der Parkplätze entspricht. Dabei werden keine einzelnen Parkplätze räumlich modelliert, sondern es wird ein Puffer um die Straßenachse gelegt, dessen Fläche den Parkplätzen entspricht [14]. Für die Länge entlang der Straße, die ein Parkplatz einnimmt, gilt:

$$l_{\text{je parkplatz}} = \begin{cases} l_a, & \text{bei paralleler Ausrichtung} \\ l_b, & \text{bei senkrechter Ausrichtung} \\ l_b \times \sqrt{2}, & \text{bei diagonaler Ausrichtung} \end{cases} \quad (11)$$

wobei l_a die Parkplatzlänge ist und l_b die Parkplatzbreite.

Die Anzahl der Parkplätze entlang einer Straße lässt sich zudem über den abstrakt modellierten Flächenbedarf ausdrücken. Dabei entspricht die Anzahl der Parkplätze dem Verhältnis der gesamten (noch nicht feststehenden) Fläche der Straße inklusive Puffer geteilt durch die Fläche eines Parkplatzes, wobei w_{puffer} die Puffer-Breite ist und $l_{\text{straße}}$ die Straßenlänge im Ganzen:

$$\frac{l_{\text{straße}} \times w_{\text{puffer}} \times 2}{l_a \times l_b} \quad (12)$$

Zum anderen lässt sich die Anzahl der Parkplätze auch ausdrücken über die folgende Formel für die konkreten – angenommen – Platzverhältnisse:

$$\frac{l_{\text{straße}} \times a_{\text{eff}} \times n_{\text{seiten}}}{l_{\text{je parkplatz}}} \quad (13)$$

a_{eff} drückt dabei aus, welcher Anteil der Straße effektiv für Parkplätze zur Verfügung steht, abweichend von 1 beispielsweise durch Bäume, Beete, Fußgängerüberwege etc. Da keine Daten zur Verfügung standen, wird a_{eff} auf 0,3 gesetzt, was vermutlich eher unterhalb der Realität liegt.

n_{seiten} ist die Anzahl der Straßenseiten, die für das Parken zur Verfügung stehen, entsprechend gilt

$n_{\text{seiten}} = 1$ für OSM-Keys mit Parken auf der linken oder rechten Straßenseite und $n_{\text{seiten}} = 2$ für das Parken auf beiden Straßenseiten, siehe Tabelle 9.

Die beiden oben genannten Terme lassen sich gleichsetzen und nach der Pufferbreite w_{puffer} umformen, wobei der (dann von der Straßenlänge unabhängige) folgende Term entsteht:

$$w_{\text{puffer}} = \frac{a_{\text{eff}} \times n_{\text{seiten}} \times l_a \times l_b}{l_{\text{je parkplatz}} \times 2} \quad (14)$$

Ein Abgleich von Luftbildern und den OSM-Daten, beispielsweise für das Anwendungsgebiet in Hamburg, zeigt zwar eine umfängliche Abbildung von Straßen in OSM, gleichzeitig aber eine sehr lückenhafte Dokumentation der Parkmöglichkeit in den entsprechenden OSM-Objekten. Eine manuelle Aufnahme der Parkplatzsituation erscheint nicht praktikabel. Eine automatisierte Auswertung beispielsweise über KI-gestützte Erkennungsverfahren anhand von Luftbildern ist zwar grundsätzlich denkbar, aber im Rahmen des Promotionsvorhabens nicht umsetzbar. Da die fehlende Berücksichtigung dieser Straßenparkplätze als schwerwiegender zählen dürfte als eine vereinfachte Modellierung, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit entschieden, allen Straßen, die keine Angabe der Parkplatzsituation in OSM enthalten, ein Parkplatzpotential zuzuweisen. Es wird mit der geringstmöglichen Pufferbreite entsprechend dem vorhergehendem Abschnitt, also der Annahme von parallelen Parkplätzen ($l_{\text{je parkplatz}} = l_a$) und einer nur einseitigen Parkplatzmöglichkeit ($n_{\text{seiten}} = 1$) modelliert.

Parkplätze an
sonstigen Straßen



Abbildung 6: Schematische Darstellung der Bedarfe und Parkflächen

Zusammenfassend können so also aus OSM verschiedene Eingangsdaten aufbereitet werden, um Parkflächen zu modellieren. Dabei werden in OSM geometrisch ausgedehnte Parkflächen berücksichtigt, als auch punktförmige Objekte mit Angabe der Kapazität und linienförmige Straßen-Objekte.

3.5.4 Rasterrechnung und räumliche Verteilung

Es wird angenommen, dass öffentliche Ladestellen bedarfsgetrieben errichtet werden. Die vorhergehend bestimmten Parkflächen und punktförmigen, bewerteten Bedarfe gilt es damit in einem effizienten Verfahren zu nutzen, um Verteilungen von Ladestellen in der Nähe der Bedarfe auf den Parkflächen zu modellieren.

Im Gegensatz zu der Modellierung der Heimladestellen (Kapitel 3.4) ist hierbei essentiell, den räumlichen Bezug der verschiedenen Daten zu beachten, um den Zusammenhang von POI und Parkplätzen in Laufreichweite abzubilden und eine Überversorgung von Gebieten zu vermeiden (vgl. [15; 50]).

Für eine effiziente Berechnung eignet sich hierbei eine rasterbasierte Modellierung, da diese nach vorbereitenden Schritten eine direkte Berechnung in Form von Matrizen ermöglicht und keine einzelnen Vektorobjekte mit höherem Datenumfang benötigt. Beim Rastern werden Punktwerte im Raster addiert. Flächen werden so konvertiert, dass das (boolesche) Rasterpixel dann positiv ist, wenn die Fläche den Mittelpunkt des Rasterpixels berührt, siehe Abbildung 7.

Rasterrechnung als
effiziente
Modellierung

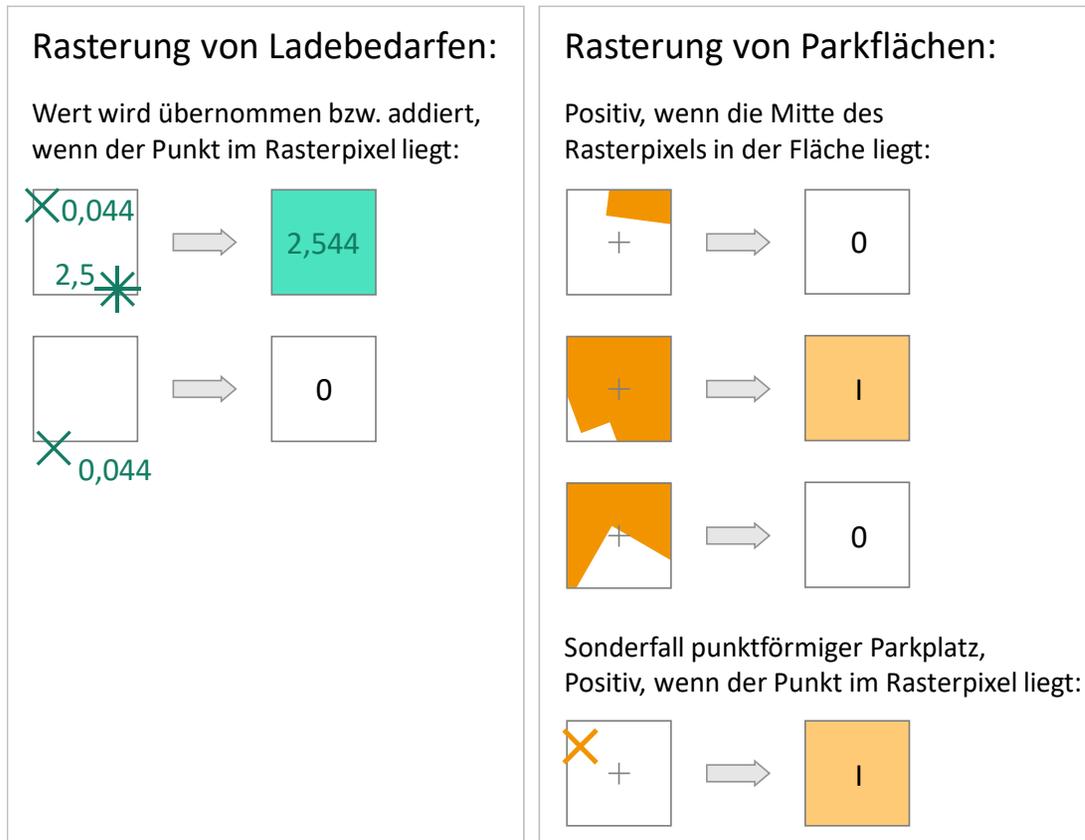


Abbildung 7: Umwandlung Vektor in Raster

In der Abbildung 8 ist die Transformation der Vektordaten (siehe Teilabbildung a) der punktförmigen Bedarfe und der Parkflächen in einem Rasterformat (siehe Teilabbildung b) dargestellt. Die Abbildung ist dabei schematisch und die Rasterpixel-Auflösung im eigentlichen Modell deutlich feiner: So ist die Rastergröße im Modell so gewählt, dass ein Pixel einem Parkplatz entspricht, also eine Fläche von 15 m² besitzt (vergleiche Kapitel 3.5.3 und [116]) und damit eine Kantenlänge von 3,873 Metern hat. Dies ermöglicht bei der weiteren Methodik die Bewertung und virtuelle Belegung von Parkflächen anhand einzelner Pixel und damit eine effiziente Berechnung [14].

Das Raster der Parkflächen (Abbildung 8b, orange) unterscheidet dabei nur die booleschen Werte 0 und 1. In dem oben genannten Sonderfall, dass eine Parkfläche in OSM nur punktförmig und auch ohne Angabe der Kapazität vorliegt, wird

Einzel Schritte
Rasterrechnung

das Eingangsobjekt nicht flächig, sondern punktförmig dargestellt. Es entsteht damit in der gerasterten Karte ein einzelnes Pixel. Das Raster der Bedarfe übernimmt die Bewertung der Bedarfe, oder addiert sie im Falle mehrerer Objekte in einem Rasterpixel (Abbildung 8b, türkis).

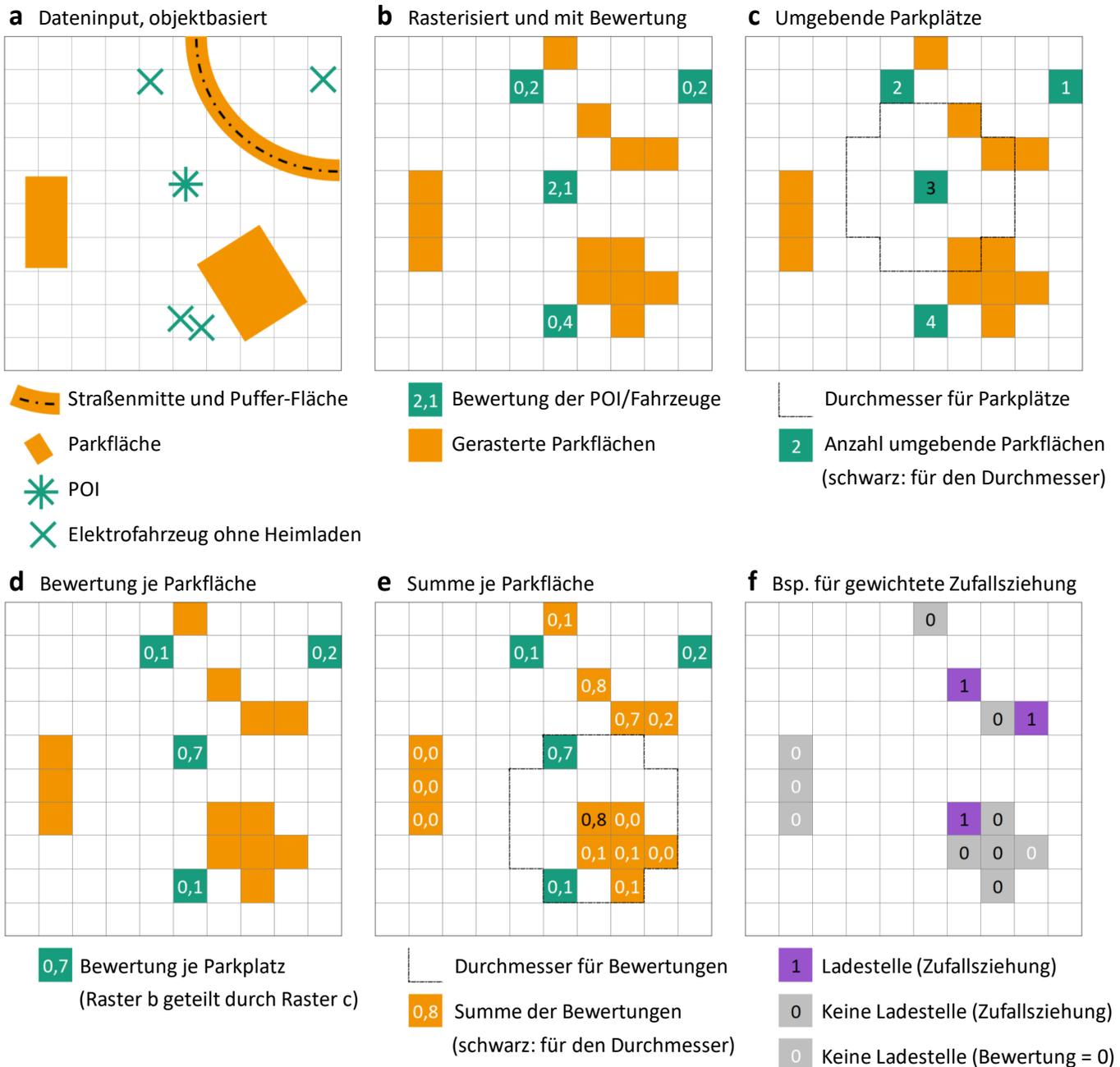


Abbildung 8: Rasterrechnung (vergleichbare Abbildung in [14])

Im nächsten Schritt (Abbildung 8c) wird allen Pixeln mit Bedarfen eine Anzahl an umgebenden Parkplätzen zugeordnet. Dies geschieht über einen beweglichen, kreisförmigen Filter (der englische Begriff des *Moving Kernel* ist hier sprechender) als Rasterfunktion. Als Kernelradius werden 300 Metern gewählt, was einer üblichen Entfernung zwischen zwei Bushaltestellen entspricht [117; 118].

Eine Division der Bewertung aus Abbildung 8b durch die Anzahl der umgebenden Parkplätze Abbildung 8c ergibt die Bewertung je Parkfläche im Rasterpixel des Bedarfs, siehe Abbildung 8d. Mit diesem Zwischenschritt kann über einen erneuten Moving Kernel die Summe der umgebenden Bewertungen für die Parkplätze bestimmt werden, siehe Abbildung 8e.

Zusammenfassend werden also die Bewertungen aus Abbildung 8b gleichmäßig auf die umgebenden Parkplätze verteilt (Abbildung 8e). Dies bildet die Grundlage für eine gewichtete Zufallsziehung, in dessen Ergebnis eine räumliche Verteilung von Ladestellen generiert wird, siehe ein Beispiel in Abbildung 8f. Der Modell-aufbau ermöglicht zudem eine effiziente Generierung mehrerer Verteilungen, die in der probabilistischen Netzberechnung genutzt werden können, da nur der letzte Schritt mehrmals durchgeführt werden muss [14].

Zusammenfassung
Rasterrechnung

Die Methodik erfüllt damit die eingangs genannten Kriterien der punktgenauen Modellierung (entsprechend einer Parkplatzgröße), der holistischen Modellierung unter Einbeziehung der Heimladestellen und berücksichtigt an verschiedenen Stellen die lokalen Begebenheiten vor Ort, insbesondere anhand der lokalen POI und der Parkplatzverhältnisse.

Abgleich mit
Kriterien

3.5.5 Validierung der Ladebedarfe

Die Validierung bezieht sich dabei auf die Frage, ob der vorliegende Zwischenschritt der Bewertung von Ladebedarfen geeignet ist für die Platzierung von Ladestellen (die wiederum Anwendung findet in der Netzberechnung). Dafür werden erstens vier Kriterien zur Modellqualität im Vergleich mit anderen Verfahren untersucht. Zweitens wird mit einer Korrelationsanalyse die Plausibilität der Modellergebnisse untersucht.

Für ein valides Verfahren sollten die folgenden vier Fragen positiv beantwortet werden können:

Kriterien zur
Modellqualität

- Werden städtische Gebiete und Randgebiete in der Bewertung unterschieden?
- Besteht eine Heterogenität der Bewertung im Betrachtungsgebiet?
Werden unterschiedliche Räume nicht differenziert, trägt das Verfahren kaum zum Erkenntnisgewinn bei.
- Besteht eine mittlere Granularität der Ergebnisse?
Eine sehr hohe Granularität (feiner als Straßenzüge) würde ggf. auf eine Pseudo-Genauigkeit hinweisen, eine niedrige Granularität (gröber als Stadtviertel) wiederum kaum zum Erkenntnisgewinn beitragen.

- Wird eine plausible Bandbreite an Bewertungsergebnissen abgebildet?
Für eine zeitliche Auslastung würde man Werte zwischen 0 Stunden und einem Maximalwert von <24 Stunden erwarten; für eine einheitenlose Bewertung einen Minimalwert von 0.

Vergleichsverfahren

Die Fragen werden für die folgenden vier Verfahren beantwortet:

1. Eigenes Modell: Das Modell, wie es in der vorliegenden Arbeit beschrieben ist.
2. Vereinfacht: Modell analog zum Verfahren 1, im Modellaufbau aber ohne Kopplung zum Heimladen aufgebaut.
3. KI-Verfahren: Bildet mögliche zeitliche Auslastungen im Rasterformat ab. Wurde trainiert unter anderem mit Daten realer Ladenstellenauslastungen, Methodik siehe [21]. Die mögliche Stärke eines solchen Verfahrens liegt in der automatisierbaren Nutzung breiterer Eingangsdaten und der Berücksichtigung (auch kombinierter) Einflüsse, die dem Entwickler nicht explizit bekannt sind.
4. Abstandsmodell: Ein triviales lineares Modell, dessen Ladebedarfswert direkt aus der Entfernung zum Stadtzentrum abgeleitet wird.

Durch den Vergleich der verschiedenen Verfahren kann nicht nur beantwortet werden, ob das vorliegende Modell valide erscheint, sondern auch, inwieweit ein unterschiedlich komplexer Modellaufbau einen Mehrwert bietet und wie das Modell im Vergleich zu einem in der Literatur beschriebenen Verfahren abschneidet.

Abweichendes
Anwendungsgebiet

Abweichend zu dem sonst in der vorliegenden Arbeit gewählten Anwendungsgebiet (Hamburg), beziehen sich die Ergebnisse des Verfahrensvergleichs aufgrund der Datenverfügbarkeit des KI-Verfahrens auf Wiesbaden. Da in den Verfahren 3 und 4 keine Parkplatzpotentiale genutzt werden, werden sie auch in Verfahren 1 und 2 außer Acht gelassen und die Ladebedarfe auf alle umgebenden Pixel verteilt.

Übersicht der
vier Verfahren

Die vier Verfahren lassen sich durch folgende Verfahrenstypen, Eingangsdaten, das mögliche Vorhandensein einer Modellkopplung und die Art der Bewertungsgröße unterscheiden, siehe Tabelle 10:

Tabelle 10: Verfahrensvergleich öffentliches Laden (vergleiche [14])

Nr.	Typ & Ursprung	Eingangsdaten	Modellkopplung zum Heimpladen	Art der Bewertungsgröße
1	multiparametrisches Modell, eigene Entwicklung	POI, Input Heimpladendmodell	ja	einheitenlos
2	multiparametrisches Modell, eigene Entwicklung	POI, MFH	nein	einheitenlos
3	empirisches KI-Verfahren, Literatur*	POI, Bevölkerungsdaten, und weitere	nein (oder indirekt**)	Auslastung in Stunden
4	lineares Abstandsmodell, eigene Entwicklung	Abstand zum Zentrum	nein	einheitenlos, aber analog zu Metern

* Verfahren siehe [21]; Daten für Auswertung zur Verfügung gestellt durch Geospin GmbH

** das KI-Verfahren nutzt zahlreiche Eingangsdaten, bei denen grundsätzlich ein Zusammenhang zu Aspekten, die auch für das Heimpladen eine Rolle spielen, nicht ausgeschlossen werden kann.

Den zweiten Teil der Validierung bildet ein Korrelationsvergleich der oben genannten Verfahren, siehe auch [14]. Hiermit alleine kann keine direkte Eignung für die Anwendung nachgewiesen werden. Mit der Prüfung der folgenden Hypothesen kann jedoch untersucht werden, ob ähnliche Verfahren auch ähnliche Ergebnisse generieren, was für valide Verfahren eine Voraussetzung wäre:

1. Hypothese: Aufgrund des ähnlichen Modellaufbaus ähneln sich die Ergebnisse von Nr. 1 und Nr. 2 stärker als die Ergebnisse von Nr. 1 (oder Nr. 2) und Nr. 3:

$$r_{1,2} > r_{1,3} \quad (\text{und } r_{1,2} > r_{2,3})$$

2. Hypothese: Da die Verfahren 1 bis 3 alle dezidierte räumliche Daten wie POI nutzen, sind die Ergebnisse von Nr. 1 bis Nr. 3 untereinander ähnlicher, als die Ergebnisse Nr. 1 bis Nr. 3 im Vergleich zu Nr. 4:

$$r_{x,y} > r_{x,4} \quad (\text{für } x, y \in \{1;2;3\})$$

Zusammenfassend wird also ergänzend zu der Erfüllung der formalen Kriterien in 3.5.4 erstens die Modellqualität im Vergleich mit drei anderen Verfahren untersucht. Zweitens werden die Verfahrensergebnisse anhand einer Korrelationsanalyse verglichen.

3.6 Szenarienbildung und Schnittstelle

In den vorangehenden Kapiteln wurde gezeigt, mit welchen Methoden Ladestellen regionalisiert werden können, angefangen auf der Gemeindeebene, über die Modellierung des demografischen Wandels und einzelner Haushalte bis hin zu der punktgenauen Verortung von Heimladestellen und (halb-) öffentlichen Ladestellen. Auch entsprechend der Vision des Forschungsvorhabens sollen diese Regionalisierungsmethoden aber nicht nur für sich stehen, sondern zusätzlich auch einen weiteren Erkenntnisgewinn über die Anwendung in Netzberechnungen im Rahmen von Szenarien ermöglichen.

Zielsetzung des Kapitels

Zielsetzung ist damit, die regionalisierten Ladestellen in einer Art und Weise aufzubereiten und in einer Schnittstelle zur Verfügung zu stellen, dass sie effizient für die Szenarienbildung genutzt werden können und mit anderen Forschungsarbeiten (wie beispielsweise einer Untersuchung der Ladezeiten) verknüpfbar sind.

Struktur des Kapitels

Dafür ermöglicht die Regionalisierungsmethodik (siehe Kapitel 3.4 und 3.5) die Bildung unterschiedlicher Szenarien anhand einer Sortierung der vorbereiteten Daten, siehe Kapitel 3.6.1. Die Daten werden in einer Datenbankschnittstelle zur Verfügung gestellt, die eine Versionierung, Prüfung und Filterung ermöglicht, siehe Kapitel 3.6.2.

3.6.1 Szenarienbildung

Die regionalisierten Ladestellen können in der Szenarienbildung und weiterfolgenden Berechnungen genutzt werden. Dafür müssen die Ladestellen flexibel einem Ausbaujahr zugeordnet werden können, in unterschiedlichen Szenarienrahmen einsetzbar sein und kombinierbar mit anderen für die jeweilige Forschungsfrage relevanten Daten, wie beispielsweise regionalisierten Erneuerbare-Energien-Anlagen. Die folgenden Eigenschaften, die durch die Modellierung anhand der in Kapitel 3.1 bis 3.5 beschriebenen Methoden gegeben sind, sind dafür zentral:

Eigenschaften der regionalisierten Ladestellen

- Die holistische Modellierung erlaubt realistische Kombinationen von Heimladestellen und öffentlichen Ladestellen, ohne deren Wechselwirkung zu ignorieren.
- Durch das Prinzip der Zufallsziehung stehen Verteilvarianten zur Verfügung, die unter anderem probabilistische Netzberechnung ermöglichen [13].

- Die Verknüpfbarkeit mit anderen Daten und Methoden ist gegeben, insbesondere den Folgenden:
 - Mit ebenfalls punktgenau verorteten Erneuerbare-Energien-Anlagen (erstellt im Projekt „Ladeinfrastruktur 2.0“ [17])
 - Mit (Verteil-) Netzberechnung, wie von ULFFERS in [13] und von SCHOEN ET AL. in [119] gezeigt wird.
 - Mit Zeitreihen, die mögliche Ladevorgänge an den Ladestellen beschreiben. Insbesondere hier bietet die detaillierte sozioökonomische Charakterisierung der Haushalte (siehe Kapitel 3.3) die Möglichkeit, spezifische Fahrprofile, aufgeteilt nach regionalen Typen, Einkommensverhältnissen und Haushaltstypen, zuzuordnen [23; 120].
- Die Ladestellen besitzen eine Zubau-Reihenfolge und ermöglichen damit die Abbildung von Zwischenausbauständen (entsprechend einzelner Szenarienjahren) auf dem Weg zum Szenarienziel.
- Durch die Struktur des Modells und der Datenablage können unterschiedliche Szenarien gebildet werden, ohne die gesamte Berechnungsmethodik der Regionalisierung – die in einigen Schritten eine hohe Berechnungsdauer umfasst – durchzuführen.

Auf die letzten beiden Aspekte wird im Folgenden vertieft eingegangen. Jede der Ladestellen besitzt eine Nummer, die beschreibt, in welcher Reihenfolge ein Ausbau plausibel erfolgen kann. Mit den Nummern können den Ladestellen Ausbauzeitpunkte zugeordnet werden, schematisch dargestellt in der Abbildung 9. Neben den Heimpladestellen und den (halb-) öffentlichen Ladestellen ist mit den Firmenladestellen hier ein weiterer Datensatz aufgenommen, der im Rahmen des Forschungsprojektes „Ladeinfrastruktur 2.0“ vom Autor modelliert wurde, aber nicht Fokus der vorliegenden Arbeit liegt.

Beispiel Methodik
Szenarienbildung

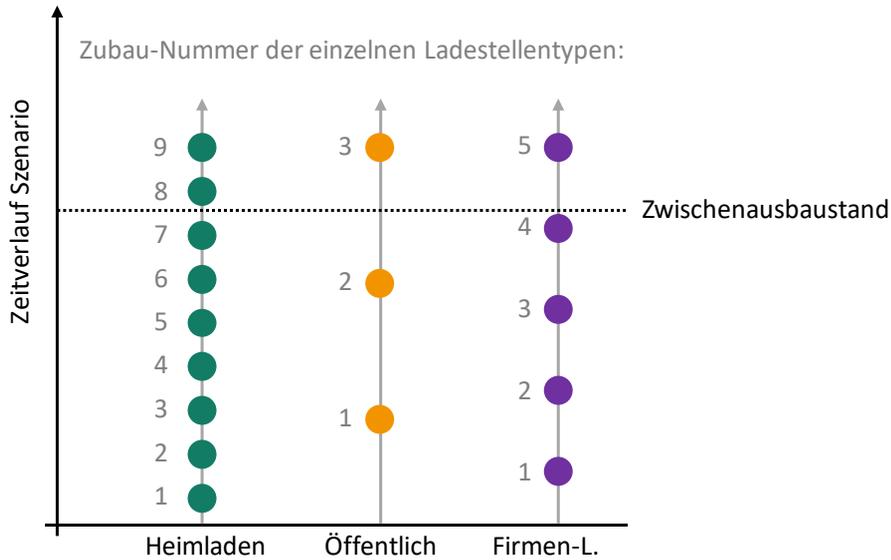


Abbildung 9: Zubaureihenfolge der Ladestellentypen, schematisch

Mit dieser Methodik können auch andere Szenarien abgebildet werden, beispielsweise ein verstärkter Zubau der öffentlichen Ladeinfrastruktur und ein im Gegenzug reduzierter Zubau der Heimladestellen, schematisch dargestellt in Abbildung 10.

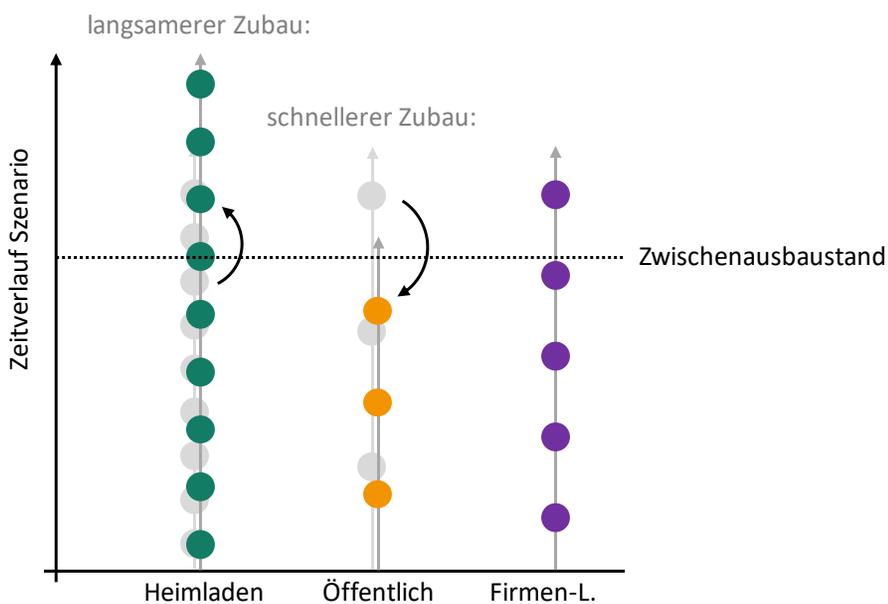


Abbildung 10: Verstärkter Zubau öffentlicher Ladeinfrastruktur, schematisch

Alle diese Ladestellen haben einen spezifischen Ort, im Falle der Heimladestellen auch eine Verknüpfung zu den sozioökonomischen Attributen der Haushalte. In der Abbildung 11a ist ein Beispiel für regionalisierte Ladestellen in einer kartografischen Darstellung gezeigt. Mit einem Gesamthochlauf lässt sich jeder La-

destelle ein Ausbaujahr zuordnen, siehe Abbildung 11b. Daneben lassen sich zusätzlich abweichende Szenarien erstellen, die beispielsweise einen reduzierten Ausbau des Heimladens (siehe Abbildung 11c) abbilden, der durch einen verstärkten Ausbau der (halb-) öffentlichen Ladestellen kompensiert wird. Damit ist insbesondere auch der Abgleich und die Verknüpfung mit anderen wissenschaftlichen Arbeiten möglich, wie beispielsweise einer Studie der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur, die verschiedene Möglichkeiten von Ladestellen-Schwerpunkten behandelt [37], siehe auch Kapitel 2.2.

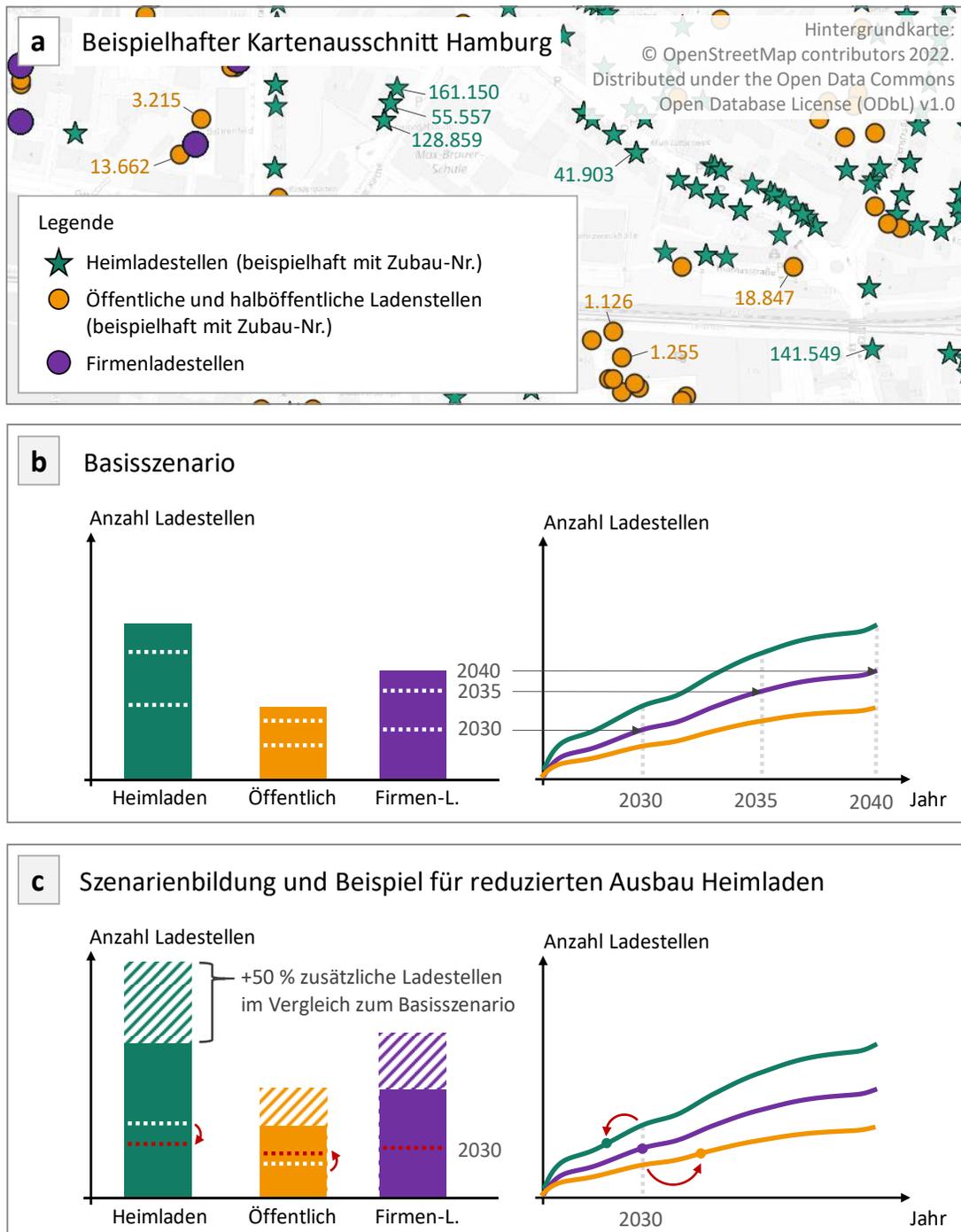


Abbildung 11: Szenarienbildung

3.6.2 Technische Umsetzung der Schnittstelle

Um die Szenarienbildung und den Zugriff unterschiedlicher Anwender:innen auf die Daten zu ermöglichen, bedarf es einer Schnittstelle. Folgende Anforderungen sind dabei zu berücksichtigen:

- effiziente Abrufbarkeit auch größerer Datenmengen
- Abbildung räumlicher Aspekte
- eine Filterung nach verschiedenen räumlichen und inhaltlichen Aspekten
- Zugriff durch unterschiedliche Nutzer:innen ohne manuelle Aufbereitung und Weitergabe der Daten
- mögliche Einbindung in die bestehende technische Infrastruktur der Wissenschaftler:innen (wie den Projektbearbeiter:innen des Projektes „Ladefrastruktur 2.0“)

Die vorliegenden Anforderungen lassen sich mit einer PostGIS-Datenbank umsetzen, insbesondere, da eine solche Datenbank räumliche Abfragen (engl. „spatial requests“) in Structured Query Language (im Folgenden: SQL) ermöglicht (vgl. [121]). Die Datenbank wird auf Fraunhofer IEE-internen Servern gehostet und erlaubt den Zugriff verschiedener Nutzer mit Lese- oder Lese- und Schreibrechten.

Die Schnittstelle in Form einer Datenbank-Tabelle umfasst folgende Spalten:

Tabelle 11: Spalten der Datenbank-Tabelle für das Schnittstellendesign

Spalte	Format	Beispiel	Erläuterung
Geometrie	Geometry	0101000020E61[...]	Punktförmige Geometrie, die mit der PostGIS-Erweiterung direkt für räumliche Abfragen und Darstellungen genutzt werden kann
AGS	Text	2000000	Amtlicher Gemeindeschlüssel, hier: Hamburg
Typ	Text	Ladestelle	Anderes Beispiel wäre PV-Anlage
Untertyp	Text	Heimladen	Anderes Beispiel wäre Firmenladen
ID	Text	2000000_273066	Eine ID zur Verknüpfung mit weitergehenden Tabellen, bspw. einer Tabelle der Haushalte, die sozioökonomische Daten enthält
ID-Typ	Text	Haushalts-ID	Zur Erläuterung, wie die ID aufgebaut ist (anderes Beispiel wäre die Gebäude-ID für Anlagen, die keinem Haushalt zugeordnet sind, wie Gebäude-Wärmepumpen)
Leistung	Zahl	11	Anschlussleistung in kW
Nummer Verteilung	Zahl	35	Nummer von 1 bis 50. Alle Verteilungen liegen 50-fach vor für die probabilistische Netzberechnung, siehe bspw. Kapitel 3.4.2
Nummer Zubau	Zahl	1383	Nummer je Untertyp und Verteilungsnr., die die Reihenfolge des Zubaus abbildet. Zentral für die Szenarienbildung, siehe Kapitel 3.6.1
Ladeprofiltyp	Text	71210110	Schlüssel zur Zeitreihenverknüpfung, hier: 71 = Regionaltyp Metropole 2 = mittleres Einkommen 1 = Singlehaushalt 0110 = 11 kW Leistung
Qualität	Text	Haushaltsdaten und Gebaeude- daten vorhanden	Spalte, in die von verschiedenen Modellkomponenten Qualitätsmerkmale wie Datenvollständigkeit eingepflegt werden können.
Eingabe- datum	Zeit- stempel	2021-11-02 16:42:47.953113	Zeitstempel der Datengenerierung für eine mögliche Fehlernachvollziehbarkeit
Versions- nummer	Zahl	20	Aufsteigende Nummer bei Aktualisierung für eine Wiederherstellbarkeit alter Versionen
Versions- beschreibung	Text	Demographie, mit Neubaugebieten	Kurze Charakterisierung der laufenden Attribute des Modellstandes

Diese Schnittstelle ermöglicht die Abfrage, Auswahl und Verknüpfung mit weiteren Daten wie den sozioökonomischen Daten der Haushalte (Teil des Promotionsvorhabens, siehe Kapitel 3.3.2) oder den Zeitreihen (Arbeiten eines Kollegen).

3.7 Zusammenfassung der Methodik

Übersicht Methodik

Mit der vorgestellten Methodik lassen sich punktgenaue Ladestellen für das Heimladen und das (halb-) öffentliche Laden modellieren. Das zweistufige Verfahren ermöglicht dabei zunächst für ganz Deutschland die Bestimmung gemeindefeiner Zahlen für Elektrofahrzeuge und Ladestellen (siehe Kapitel 3.2) unter Einbeziehung des demografischen Wandels (siehe Kapitel 3.1), um dann in einem zweiten Schritt für eine Gemeinde eine detaillierte Modellierung der Bevölkerungs-

struktur (siehe Kapitel 3.3), der Heimladestellen (siehe Kapitel 3.4) und der öffentlichen sowieso halböffentlichen Ladestellen (siehe Kapitel 3.5) vorzunehmen. Die Ladestellen werden dann – kombinierbar mit weiteren Verbrauchern und Erzeugern und weiteren Datensätzen – für die Szenarienbildung nutzbar gemacht und über eine PostGIS-Datenbank bereitgestellt (siehe Kapitel 3.6).

Zusammenfassung
Demografischer
Wandel

Dabei werden in jedem Modellschritt lokale Begebenheiten berücksichtigt. So bezieht die Modellierung des demografischen Wandels die bestehende Altersstruktur, Alters- und Regions-abhängige Geburten, Sterbefälle und Zu- und Abwanderungen ein.

Zusammenfassung
Fahrzeug- und
Ladstellenanzahl

Die zukünftige Bevölkerung ist, neben den Fahrzeugmeldezahlen und den Pendlerzahlen, eine Eingangsgröße für die Erstellung von Verteilgrößen auf Gemeindeebene. Mit dieser Verteilgröße werden bundesweite Szenarienzahlen von Fahrzeugen, Heimladestellen und öffentlichen Ladestellen (vergleiche [13; 17; 37]) auf alle deutschen Gemeinden aufgeteilt, was die Grundlage für die Detailregionalisierung darstellt.

Zusammenfassung
Bevölkerungs-
struktur

Mit dem Anspruch einer punktgenauen Verteilung von Ladestellen und der Nutzung von sozioökonomischen Daten ist die Abbildung einzelner Haushalte inklusive des Wohnorts essentiell. Dafür werden Eingangsdaten, die sozioökonomische Daten von Haushalten zusammengefasst auf einen Straßenabschnitt dokumentieren [12], zusammengeführt mit statistischen Daten zu der Kombination von Haushaltsattributen. Zentrales Element ist dabei die Nutzung eines Iterative-Proportional-Fitting-Algorithmus, um aus bekannten Randsummen der Attribute (Haushaltseinkommen und Haushaltstyp) Einzelhaushalte mit spezifischer Attributs-Kombination zu generieren. Über eine Analyse von 3D-Gebäudevolumen mit dem Zwischenschritt einer Wohnflächen-Berechnung werden diese Haushalte bestimmten Gebäuden und damit konkreten Orten zugeordnet. Die Berücksichtigung des demografischen Wandels erfolgt über eine Hinzunahme oder Wegnahme entsprechender Haushalte. Die räumliche Verteilung der Bevölkerung wird anhand einer Korrelationsanalyse mit unterschiedlichen Datensätzen, unter

anderem den Zensus-Daten, validiert. Dafür werden Hypothesen zu der Ähnlichkeit der Datensätze aufgestellt.

Untersuchungen zeigen, dass Einkommen, Haushaltstyp, Gebäudetyp und Geschlecht einen Zusammenhang aufweisen zu der Wahrscheinlichkeit, ein Elektrofahrzeug und eine Ladestelle anzuschaffen [88; 89]. Diese sozioökonomischen Attribute werden der vorgelagerten Modellierung der Bevölkerungsstruktur entnommen und für eine Nutzwertanalyse genutzt. In dieser werden die bewerteten Ausprägungen (bspw. hohes Einkommen mit hoher Punktzahl) der gewichteten Attribute (bspw. Einkommen mit hohem Gewichtsanteil) zu einer Gesamtpunktzahl zusammengeführt. Die Nutzwertanalyse – ursprünglich ein Werkzeug zur Entscheidungsfindung mehrerer Alternativen – wird dann als Grundlage für eine gewichtete Zufallsverteilung genutzt. Durch die wiederholte Ziehung wird im ersten Schritt eine (räumlich zugeordnete) Verteilung von Elektrofahrzeugen beziehungsweise deren Besitzer:innen generiert. Im zweiten Schritt werden diese teilweise – abhängig vom Gebäudetyp – Heimpladestellen zugeordnet. Durch die wiederholte Generierung können variierende Verteilungen erzeugt werden, wie sie beispielsweise für die probabilistische Netzberechnung benötigt werden.

Zusammenfassung
Heimpladen

Elektrofahrzeuge ohne Heimpladestelle stellen wiederum einen Bedarf an öffentlich zugänglichen Ladestellen dar. Ein weiterer Bedarf entsteht an POI, wie beispielsweise Geschäften, Kirchen und Sportstätten, die Zielorte für Fahrten sind. Sie werden entsprechend der Anfahrtshäufigkeit der jeweiligen Rubrik bewertet. Diesen Bedarfen steht das Potential in Form von Parkraum gegenüber. Während einige Parkflächen direkt über die Einbeziehung von OSM-Flächen genutzt werden können, werden Parkflächen am Straßenrand modelliert, abhängig von der Ausrichtung der Parkplätze und der ein- oder zweiseitigen Parkmöglichkeit. Die gewichteten Bedarfe werden in einer rasterbasierten Berechnung auf einzelne Parkplätze aufgeteilt, die im Modelldesign jeweils einer einzelnen Rasterfläche entsprechen. Diese aufgeteilten Bedarfe ermöglichen wiederum analog zur Generierung der Heimpladestellen eine wiederholte Zufallsziehung und damit Erstellung von räumlichen Verteilungen von Ladestellen. Die Modellierung wird anhand eines Verfahrensvergleichs validiert, in dem die räumlichen Bedarfe verglichen werden mit den Ergebnissen anderer Verfahren, unter anderem einem in der Literatur beschriebenen KI-Verfahren. Dabei werden sowohl vier Kriterien zur Modellqualität einzeln geprüft, als auch mit einer Korrelationsanalyse jeweils die paarweise Ähnlichkeit der Ergebnisse untersucht.

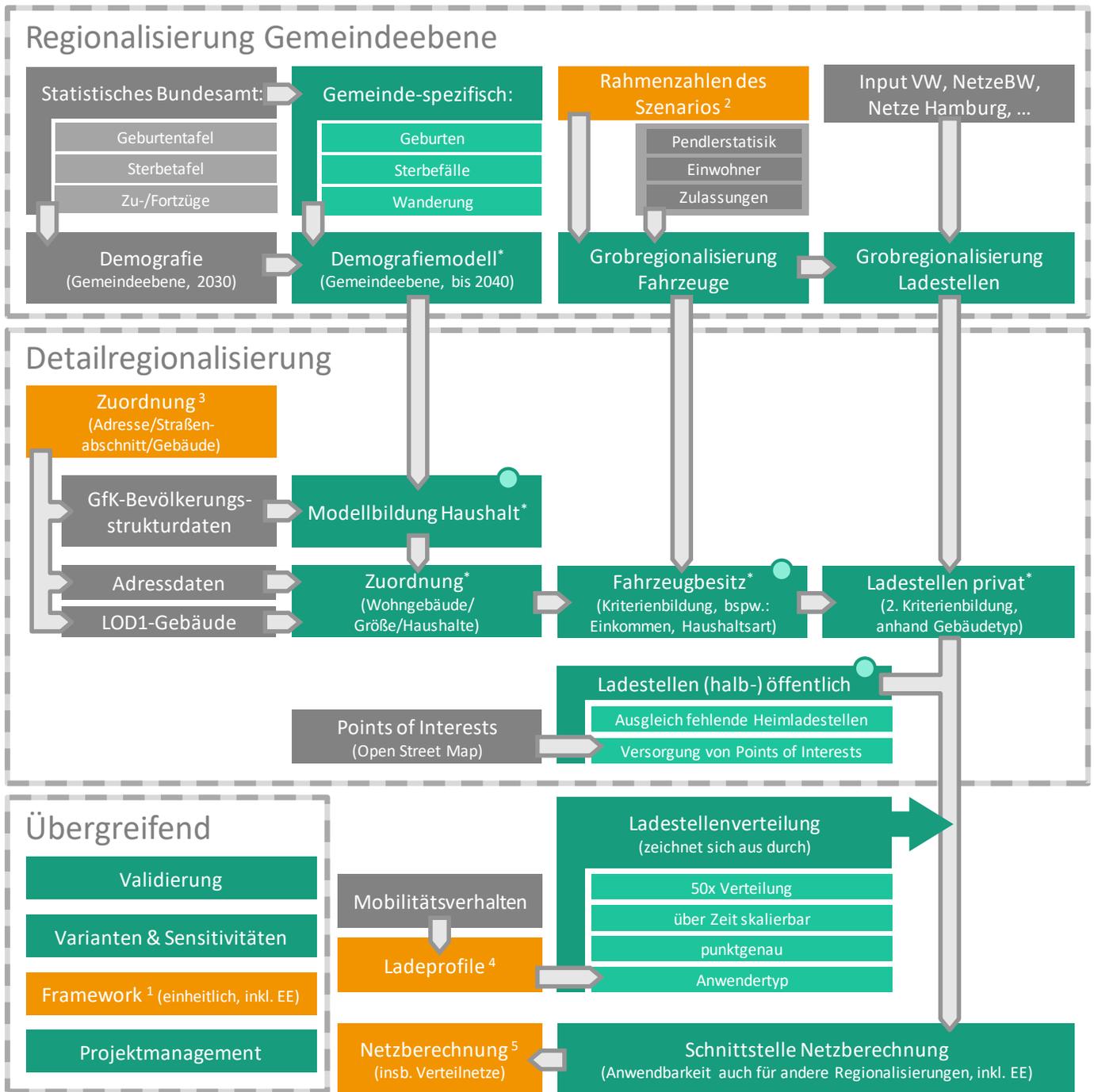
Zusammenfassung
(halb-) öffentliches
Laden

Zusammenfassung
Szenarienbildung
und Schnittstelle

Die Regionalisierungsmethodik ermöglicht die Nutzung der Ladestellen-Daten für eine Bandbreite an Szenarien. Durch die Bereitstellung der punktgenauen Ladestellen einschließlich einer Zubaureihenfolge können unterschiedliche, vom Basisfall abweichende Zusammenstellungen an Ladestellen-Anzahlen genutzt werden. So kann beispielsweise ein Szenario mit stärkerem Heimplade-Anteil generiert werden. Zentraler Vorteil des Modellaufbaus ist dabei, dass alle aufwendigeren Berechnungsschritte vorab durchgeführt werden, die Szenarienbildung selbst also nur noch auf diese schon erstellten Daten zugreift. Die Daten werden über eine Schnittstelle in Form einer PostGIS-Datenbank-Tabelle zur Verfügung gestellt und ermöglichen eine (inhaltliche wie räumliche) Sortierung, Filterung und Verknüpfung mit weiteren Datensätzen, wie beispielsweise regionalisierten Erneuerbare-Energien-Anlagen, insbesondere aber auch Ladezeitreihen. Hier ermöglicht die Nutzung der sozioökonomischen Haushaltsattribute eine stimmige Zuordnung von Fahr- und Ladezeitreihen, die für die entsprechende sozioökonomische Gruppe charakteristisch sind.

Modellschaubild
und Abgrenzung

Die Abbildung 12 zeigt die wichtigsten Modellelemente dieser Arbeit und die Abgrenzung von anderen Arbeiten auf.



Legende

Arbeiten/Verantwortung Philip Gauglitz * Teilentwicklung in betreuter Masterarbeit von Gyde Thomsen	Dateninput (oder Meinungsbildung im Projektkonsortium)	Arbeiten/Verantwortung Kollegen David Geiger ¹ ; Felix Frischmuth ² ; Daniel Horst ³ ; Michael von Bonin ⁴ ; Alexander Scheidler/Jan Ulfers ⁵
---	--	--

Zentrale Modellelemente: Die dargestellten Modellelemente haben z.T. erheblich unterschiedliche Umfänge. Um relativ große/zentrale Modellelemente zu kennzeichnen, die im Diagramm (wie kleinere Schritte auch) nur ein Kästchen in Anspruch nehmen, sind diese mit diesem Punkt gekennzeichnet.

Allgemeiner Hinweis:
 Das Diagramm zeigt den Kernaufbau und die wichtigsten Dateninputs des Modells. Es sind nicht alle Daten/Quellen und Modellschritte abgebildet.

Abbildung 12: Modellstruktur

4 Modellergebnisse

Das Kapitel der Modellergebnisse ist analog zu der Kapitelstruktur der Methodik (siehe auch Abbildung 1) gegliedert: Zunächst werden die Modellergebnisse des demografischen Wandels auf Gemeindeebene (Kapitel 4.1) vorgestellt, die eine Grundlage sind für die Bestimmung von Fahrzeug- und Ladestellenanzahlen auf Gemeindeebene (Kapitel 4.2). In der Detailregionalisierung bildet die Bevölkerungsstruktur (Kapitel 4.3) die Grundlage für die regionalisierten Heimladestellen (Kapitel 4.4). In Kapitel 4.5 werden die Modellergebnisse für die (halb-) öffentlichen Ladestellen vorgestellt, um anschließend das Ergebnis der Schnittstellenmodellierung, die für die Szenarienbildung genutzt werden kann, darzustellen (4.6).

Die Modellergebnisse für die gemeindeweiten Regionalisierungen werden für ganz Deutschland bestimmt und vorgestellt, vertieft wird auf das Anwendungsgebiet Hamburg eingegangen. Die Detailregionalisierung ist durch den Modell- aufbau grundsätzlich für alle Gemeinden in Deutschland anwendbar und wird hier ebenfalls für Hamburg durchgeführt und dargestellt. Dieses Anwendungsgebiet bietet sich an, da Hamburg als deutsche Großstadt alle Aspekte der Eingangsgroßen abbildet und gleichzeitig ein Fokus im Projekt „Ladeinfrastruktur 2.0“ ist. In vorherigen Veröffentlichungen des Autors wurde auch das Anwendungsgebiet Wiesbaden betrachtet [13; 14], auf das an einigen Stellen verwiesen wird. Aufgrund der Datenverfügbarkeit eines Vergleichsmodells wird es auch für die Validierung der öffentlichen Ladestellen (Ende des Kapitels 4.5) genutzt.

4.1 Gemeindeebene: Demografischer Wandel

Ausgehend von der Bevölkerungsprognose der Bertelsmann-Stiftung für 2030 [66] wurde entsprechend der Methodik aus Kapitel 3.1 für die Jahre 2031 bis 2040 die geschlechts- und altersspezifische Bevölkerung modelliert, womit sich beispielsweise für Hamburg die Alterspyramide in Abbildung 13 ergibt. Gut zu erkennen ist die Verschiebung der jeweiligen geburtenstarken Jahrgänge. Insgesamt ergibt sich ein Bevölkerungswachstum für Hamburg, wofür auch der deutlich überdurchschnittliche Zuzug eine Rolle spielt.

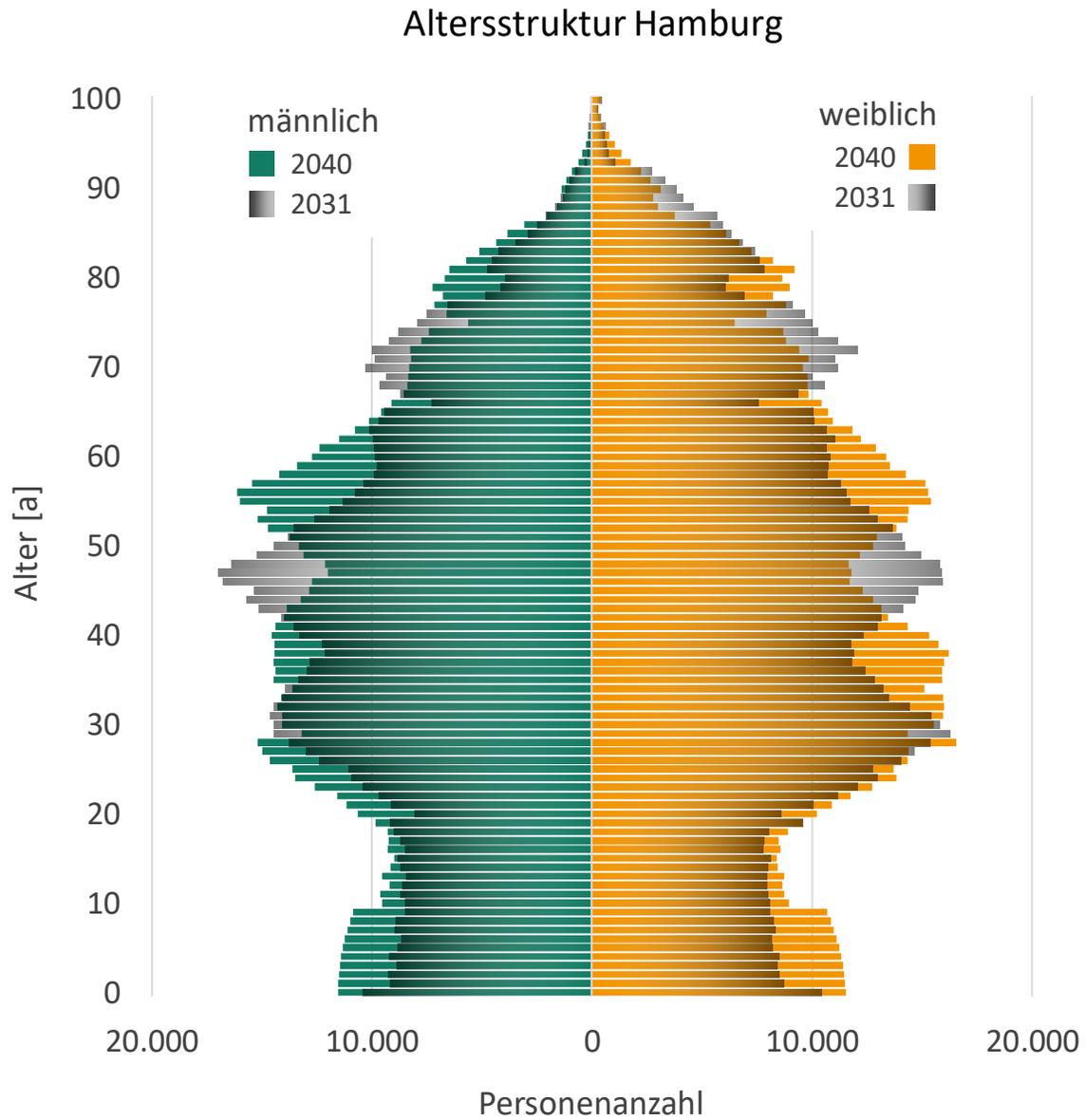


Abbildung 13: Modellierte Altersstruktur in Hamburg

Die Bevölkerung im Jahr 2040 wird für alle Gemeinden in Deutschland modelliert, womit sich folgende bundesweite Verteilung ergibt, siehe Abbildung 14:

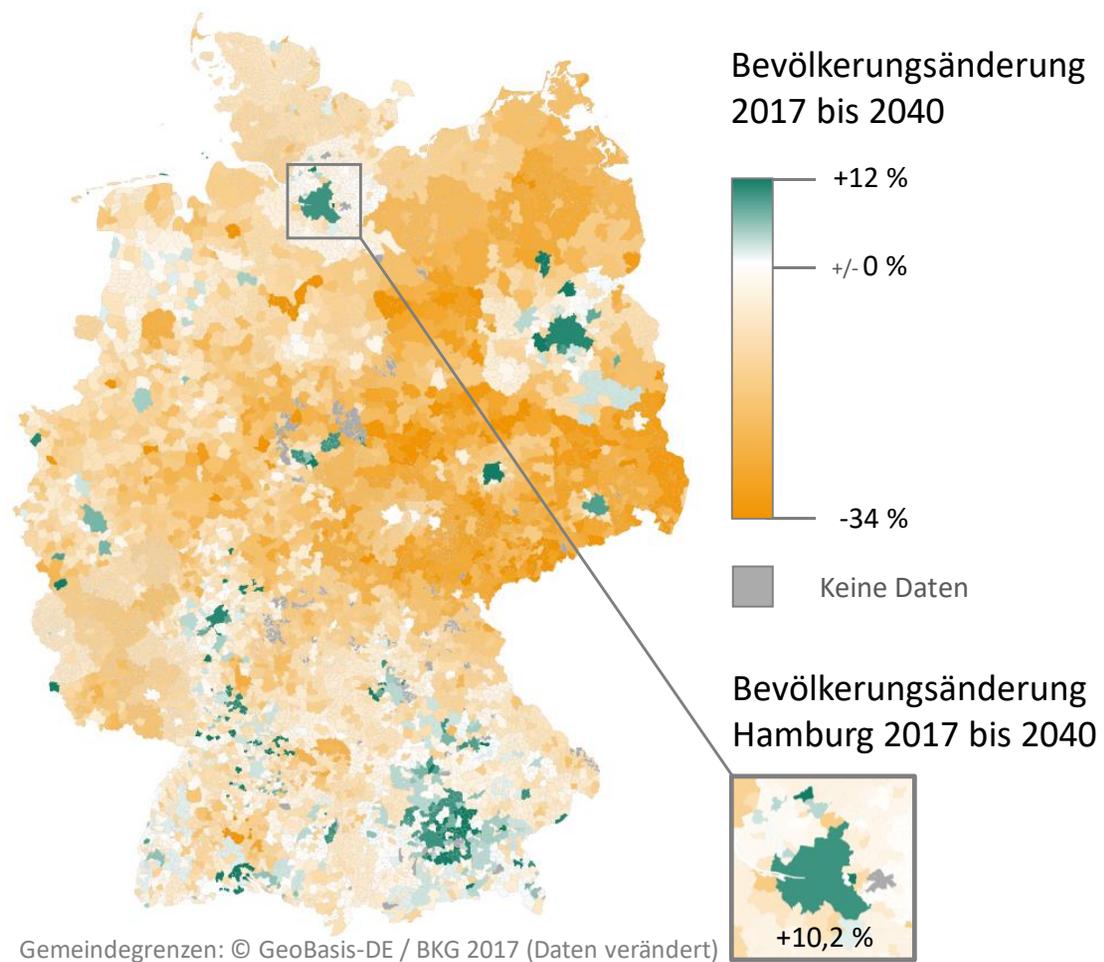


Abbildung 14: Demografischer Wandel Deutschland, Gemeindegrenzen [122]

Gut zu erkennen sind typische Änderungen in der bundesweiten Bevölkerungsverteilung wie:

- ein Wachstum in den Metropolen Hamburg und Berlin, der im Gegensatz steht zu einem bundesweiten Bevölkerungsrückgang von 6,2 %
- ein überdurchschnittlich starker Bevölkerungsrückgang in den neuen Bundesländern
- ein leichtes Wachstum in den Gemeinden in Süddeutschland, oder ein zumindest schwächer als im Durchschnitt ausgeprägter Bevölkerungsrückgang

Diese Effekte werden auch in anderen Bevölkerungsmodellierungen bis 2040 wie in [123] bestätigt. Die hier vorgestellte Modellierung zeichnet sich dabei im Vergleich durch die höhere Auflösung bis auf die Gemeindeebene aus. Auf höherer Ebene lassen sich die Daten aber vergleichen und damit zur Validierung nutzen.

So zeigt ein Vergleich der Bevölkerungsänderungen zu vorhergenannter Quelle auf Bundeslandebene eine hohe Korrelation von 0,957. Für einen Vergleich der einzelnen Bundesländer siehe Abbildung 15.

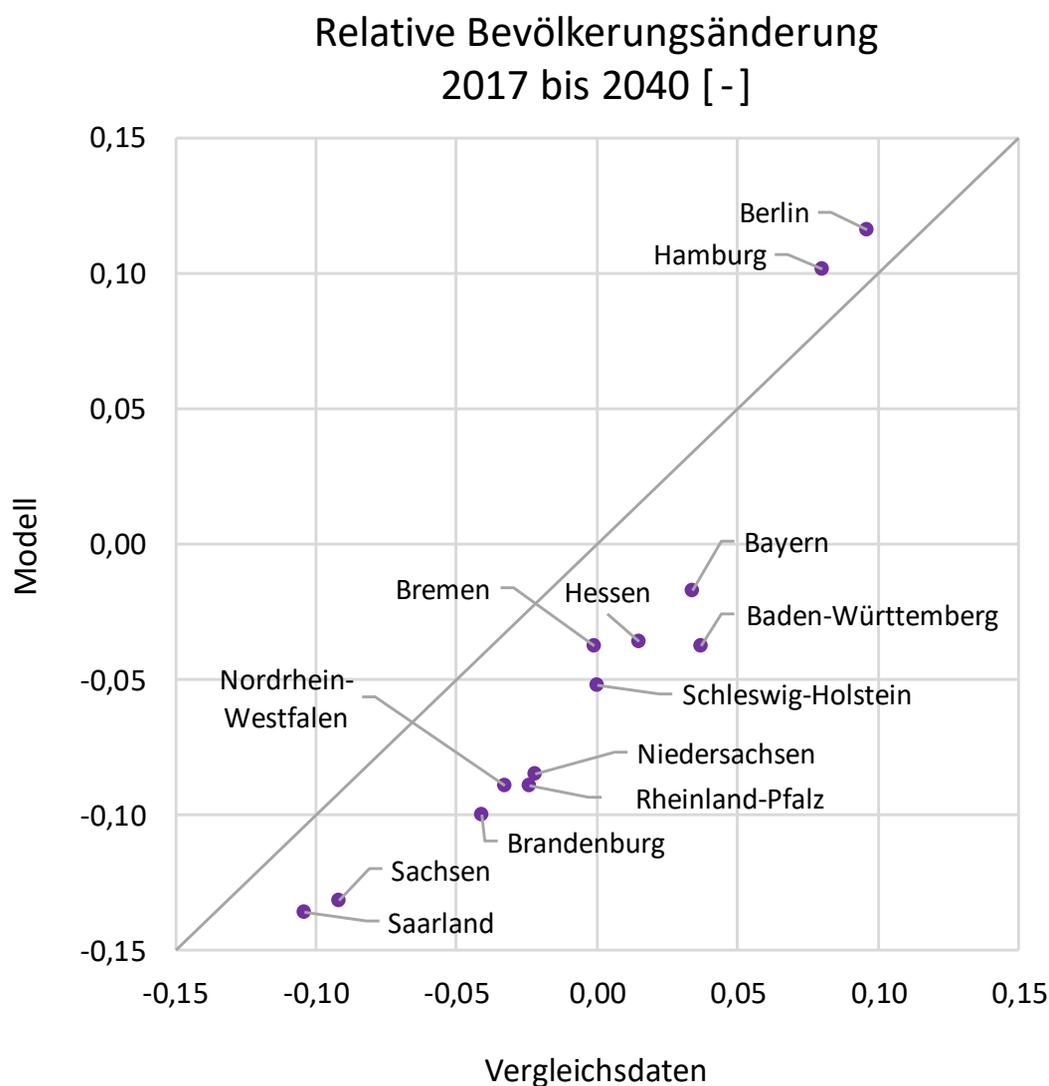


Abbildung 15: Bevölkerungsänderung, Modell u. Vergleichsdaten [123]

Die Stadtstaaten Berlin und Hamburg weisen dabei sowohl im Modell als auch in den Vergleichsdaten ein Wachstum auf. Im Vergleich zeigt das Modell ein größeres Wachstum (vgl. Punkte oberhalb der Diagonalen in Abbildung 15), was möglicherweise in einer Überschätzung des Zuzugs begründet ist. Der Zuzug ist aufgrund weniger Vergleichsjahre modelliert und kann deswegen Ungenauigkeiten aufweisen. Er kann in Zukunft bei breiterer Datenbasis aktualisiert werden.

4.2 Gemeindeebene: Fahrzeug- und Ladestellenanzahlen

Neben der demografischen Änderung, die in Hamburg wie in Kapitel 4.1 dargestellt deutlich überdurchschnittlich ist, sind auch die Fahrzeugzulassungen und die Anzahl der Auspendler für die Modellierung der Anzahl von Elektrofahrzeugen und Ladestellen auf Gemeindeebene relevant. Beide liegen in Hamburg deutlich unter dem Bundesdurchschnitt, siehe Tabelle 12.

Gemeindeebene:
Eingangsdaten

Tabelle 12: Fahrzeuge und Ladestellen auf Gemeindeebene, Eingangsdaten

	bundesweit	Hamburg
Bevölkerung 2017	82,52 Mio.	1,81 Mio.
Bevölkerung 2040	77,43 Mio.	1,99 Mio.
Entwicklung der Bevölkerung 2040 relativ zu 2017	-6,8 %	+10,2 %
Gemeldete Pkw (alle Antriebe) je Einwohner [87]	0,510	0,349
Pendlerfaktor	1 ¹	0,748 ²

¹ Bildung des Pendlerfaktors so für Deutschland nicht anwendbar. Die durchschnittliche Gemeinde hat einen Faktor von 1.

² Zum Vergleich: Die Gemeinde mit den wenigsten Auspendlern je Einwohner hat einen Faktor von 0,71 (vergleiche dazu Faktor von 0,5 in [7] für 2034). Die Gemeinde mit den meisten Auspendlern je Einwohner einen Faktor von 1,22 (vergleiche dazu Faktor von 1,5 in [7] für 2034).

Aus der in Kapitel 3.2 beschriebenen Methodik ergeben sich damit die in Tabelle 13 dargestellten Anzahlen für Elektrofahrzeuge, Heimladestellen und (halb-) öffentliche Ladestellen. Diese liegen in Hamburg mit 0,159 Elektrofahrzeugen pro Einwohner in 2040 deutlich unter dem bundesweiten Durchschnitt von 0,311 Elektrofahrzeugen pro Einwohner in 2040, was insbesondere auch an den unterdurchschnittlichen Fahrzeugzulassungen in Hamburg liegt. Tabelle 13 zeigt die Elektrofahrzeuge und Ladestellen zusammenfassend für das Anwendungsgebiet Hamburg.

Gemeindeebene:
Modellergebnisse

Tabelle 13: Fahrzeuge und Ladestellen auf Gemeindeebene, Ergebnisse

	bundesweit	Hamburg
Elektrofahrzeuge 2040	24.100.000	317.705
Elektrofahrzeuge 2040 je Einwohner 2040	0,311	0,159
Heimladestellen 2040	11.489.649	151.465
(halb-) öffentl. Ladestellen 2040	1.098.275	14.487

Wie die sonstigen Modellschritte auch ist diese Auswertung ebenso für andere Gemeinden in Deutschland möglich, so findet sich eine Tabelle mit Eingangsdaten und Modellergebnissen für das Anwendungsgebiet Wiesbaden in [13].

Die unterdurchschnittliche Elektrofahrzeug-Anzahl je Einwohner ergibt sich auch in anderen Großstädten wie Berlin oder München (Abbildung 16), was unter anderem vor dem Hintergrund eines dichteren öffentlichen Nahverkehrs plausibel erscheint.

Gemeindeebene:
Elektrofahrzeuge je
Einwohner

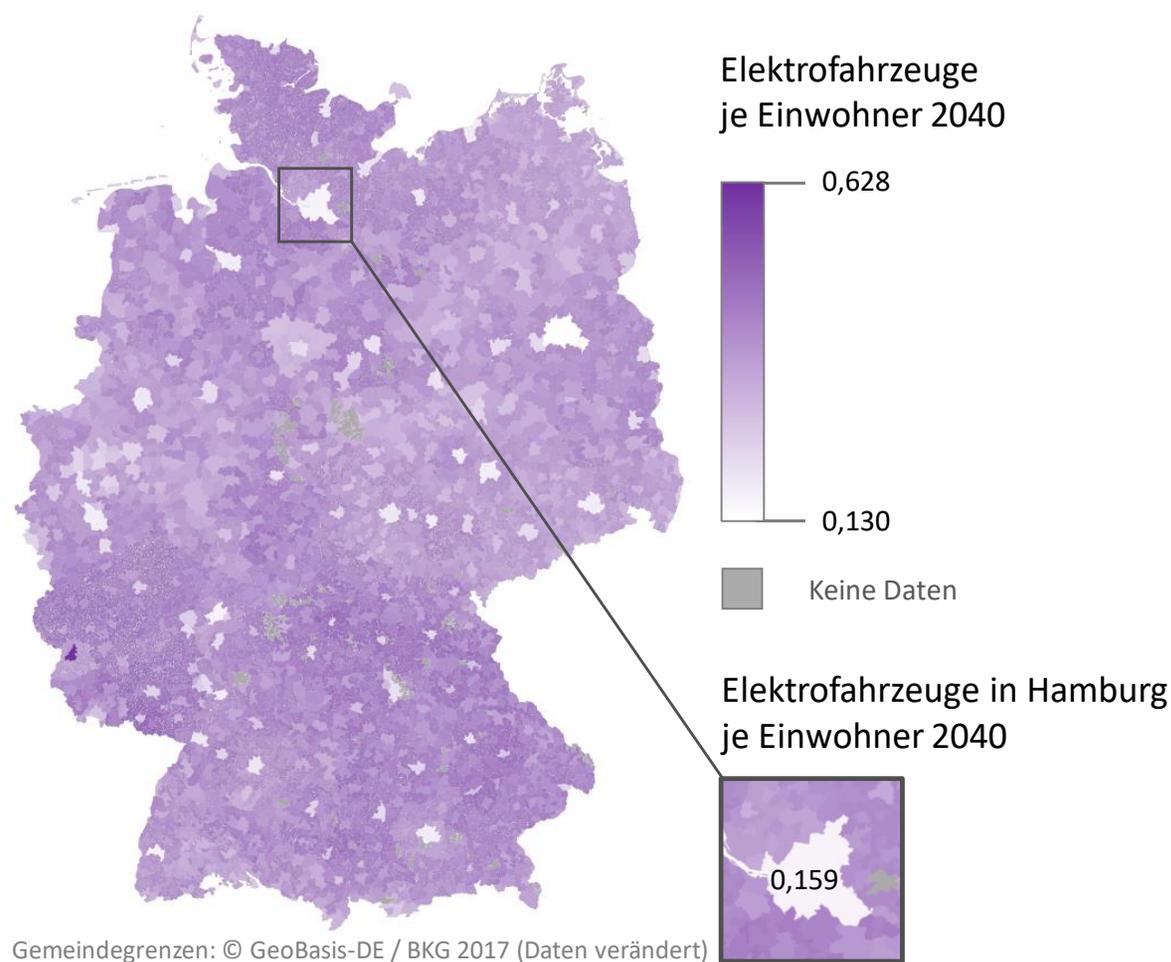


Abbildung 16: Elektrofahrzeuge je Einwohner 2040, Gemeindegrenzen [122]

4.3 Detailregionalisierung: Bevölkerungsstruktur

Tabelle 14 zeigt die Randsummen und Einzelwerte der sozioökonomischen Attribute für insgesamt 14 Haushalte in einem Straßenabschnitt in der Nähe des Lohseparks in Hamburg. Dabei ist den ursprünglichen 13 Haushalten von 2017 ein zusätzlicher Singlehaushalt mit mittlerem Einkommen durch den demografischen Wandel hinzugefügt.

Einzelwerte
sozioökonomische
Attribute

Tabelle 14: Randsummen und Einzelwerte der sozioökonomischen Attribute

	unter 2000 €	2000 bis 4000 €	über 4000 €	Summe
Single	3	2+1	0	5+1
Mehrpersonenhaushalt mit Kind	1	2	2	5
Mehrpersonenhaushalt ohne Kind	0	1	2	3
Summe	4	5+1	4	13+1

fett gedruckt: zusätzlicher Haushalt durch demografischen Wandel

Die Verteilung der Einzelhaushalte berücksichtigt dabei nicht nur die Randwerte der Bevölkerungsstruktur aus [86] wie in Tabelle 2 auf Seite 34 dargestellt, sondern entsprechend des IPF auch die realistische Kombination anhand einer Stichprobe [92]. Ein Häufigkeitsvergleich der modellierten Attributskombinationen für die Stadt Wiesbaden mit Vergleichsdaten zeigt dabei plausible Ergebnisse, wie THOMSEN in [74] gezeigt hat, siehe Tabelle 15.

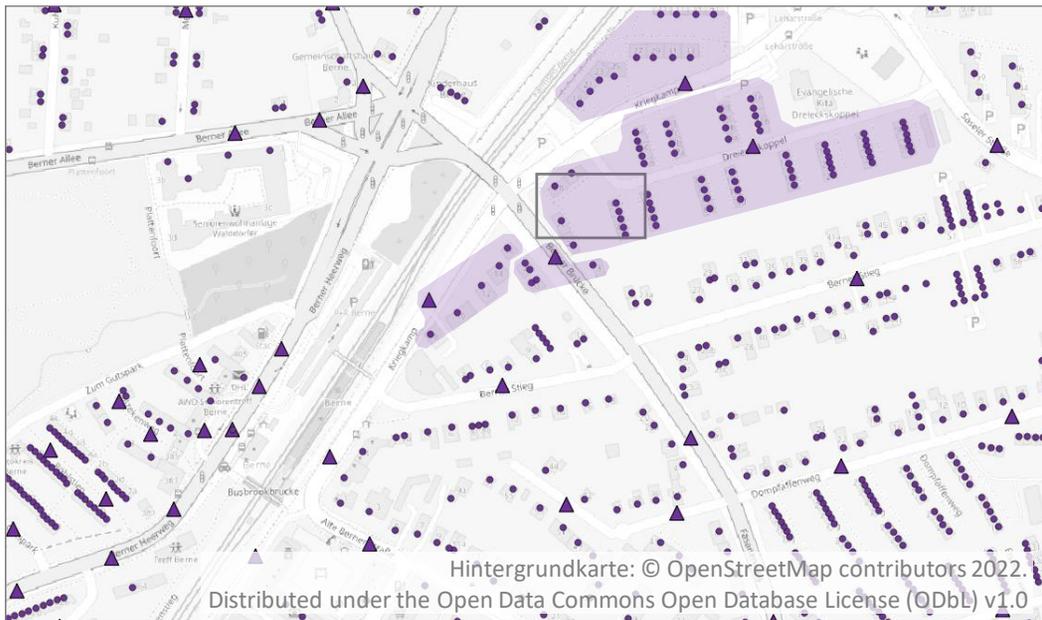
Tabelle 15: Datenvergleich Attributshäufigkeiten Wiesbaden [74; 96; 124]

	Modell	Vergleichs- daten ¹
Haushaltstyp		
Single	45,2 %	47,5 %
Mehrpersonenhaushalt mit Kind	25,5 %	32,3 %
Mehrpersonenhaushalt ohne Kind	29,2 %	20,1 %
Anzahl Personen je Haushalt		
2	58,4 %	52,2 %
3	20,2 %	22,7 %
4	13,1 %	15,5 %
5	5,2 %	5,3 %
6 und mehr	3,2 %	3,3 %

¹Vergleichsdaten Haushaltstyp: [124]; Vergleichsdaten Anzahl Personen je Haushalt: [96]

Datenauflösung

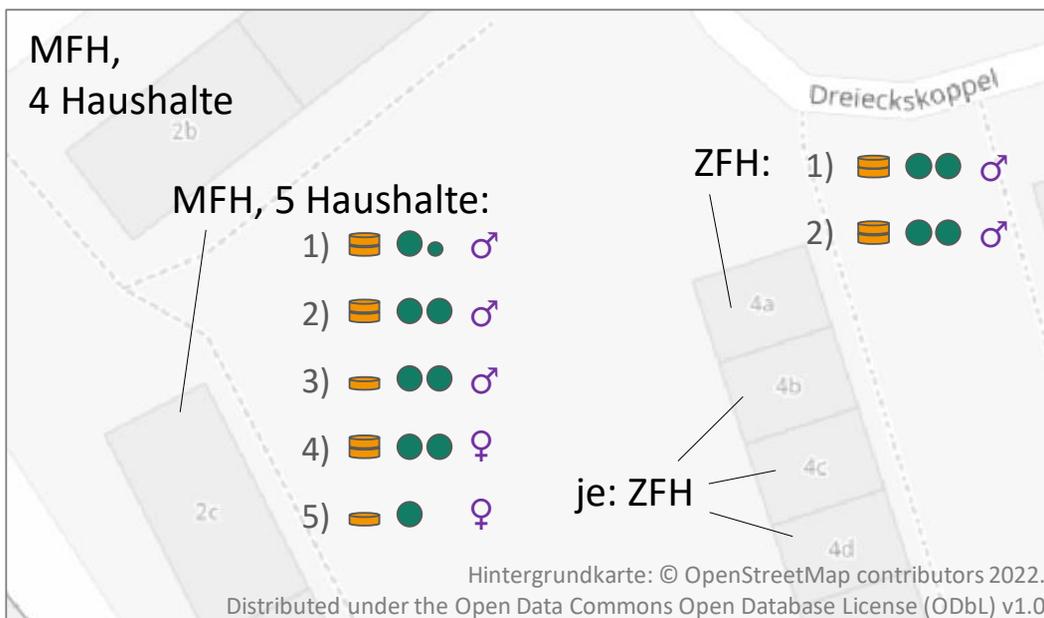
Im Folgenden werden die Zwischenschritte und Ergebnisse der Bevölkerungsmodellierung verbildlicht: Abbildung 17 zeigt die Auflösung der Straßenabschnitte, auf deren Ebene die sozioökonomischen Attribute zunächst vorliegen, und die einzelnen Gebäude, denen die Haushalte mit dem Verfahren zugeordnet werden. In Abbildung 18 ist das Ergebnis der Modellierung auf Haushaltsebene für 2040 dargestellt, inklusive der Zuordnung von Einkommenshöhe, Personenanzahl und Geschlecht des Haupteinkommensbeziehers oder der Haupteinkommensbezieherin.



Bevölkerungsstruktur:
Straßenzüge und Gebäude

-  Datenpunkte Straßenabschnitte
-  Datenpunkte Gebäude
-  Ausschnitt der folgenden Grafik
-  Beispiele für Straßenabschnitte

Abbildung 17: Auflösung Straßenabschnitte [86] und Gebäude



Bevölkerungsstruktur:
Haushalte

MFH/ZFH: Mehrfamilienhaus / Zweifamilienhaus

-    Kleines, mittleres, hohes Einkommen
-   Personenanzahl (kleiner Kreis: Kind)
-   Geschlecht der Haupteinkommensbeziehenden

Abbildung 18: Sozioökonomische Attribute der Haushalte

Datenumfang
Modellergebnisse

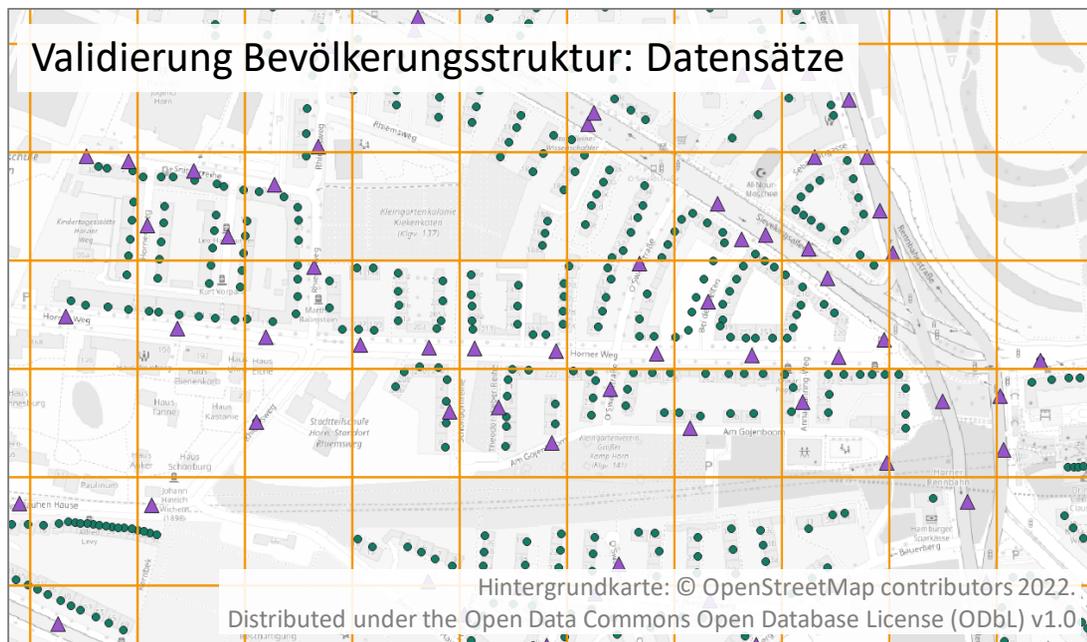
Insgesamt werden so 1,02 Mio. Haushalte in rund 0,27 Mio. Gebäuden für das Beispiel Hamburg modelliert.

Ergebnisse der
Korrelationsanalyse

Zur Validierung der Bevölkerungsverteilung wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt für:

- den Bevölkerungsdatensatz des Zensus [105]
- den Bevölkerungsdatensatz auf Straßenzugesebene der GfK [86]
- den mit der hier vorgestellten Methodik erzeugten Datensatz
- einem vereinfachten Datensatz ohne Berücksichtigung des Gebäudevolumens.

Die Datensätze sind in Abbildung 19 dargestellt:



- Zensus-Raster (Datensatz a)
- ▲ Datenpunkt GfK-Daten (Datensatz b)
- Datenpunkt eigene Modellierung (Datensatz c und d)

Dargestellt sind die ursprünglichen Datensätze. Für die Korrelationsanalyse sind die Datensätze jeweils entsprechend des Zensus-Rasters summiert.

Abbildung 19: Validierung Bevölkerungsstruktur: Datensätze [86; 105]

Jeweils zusammengefasst im Rasterformat der Zensusdaten ergeben sich – für ganz Hamburg ausgewertet – die folgenden gegenseitigen Korrelationen aus Tabelle 16:

Tabelle 16: Korrelationskoeffizienten Bevölkerungsdaten

Korrelations-
koeffizienten

	a¹	b²	c³	d⁴
a¹	1,000	0,561	0,874	0,857
b²	0,561	1,000	0,607	0,610
c³	0,874	0,607	1,000	0,961
d⁴	0,857	0,610	0,961	1,000

¹ Datensatz a: Zensus [105]² Datensatz b: GfK-Bevölkerungsstrukturdaten [86]³ Datensatz c: gebäudegenau, inkl. Berücksichtigung Gebäudevolumen und Neubau.⁴ Datensatz d: gebäudegenau, vereinfacht.

Die Auswertung der Korrelationskoeffizienten bestätigt die in Kapitel 3.3.3 aufgestellten Hypothesen:

Auswertung der
Hypothesen

1. Da alle Daten zur Bevölkerungsverteilung denselben Sachverhalt darstellen, sind alle Korrelationen positiv:

$$r_{x,y} > 0 \text{ für alle } x, y \rightarrow \text{Hypothese wird bestätigt.}$$

2. Aufgrund der höheren Auflösung und damit genaueren Verteilung weisen die Verteilungen auf einzelne Häuser eine höhere Korrelation zum Zensusdatensatz auf als die GfK-Daten zum Zensusdatensatz:

$$r_{a,c} > r_{a,b} \text{ und } r_{a,d} > r_{a,b} \rightarrow \text{Hypothese wird bestätigt.}$$

3. Eine Verteilung unter Berücksichtigung der Gebäudevolumina weist eine höhere Korrelation zum Zensusdatensatz auf als eine Verteilung ohne Berücksichtigung dieser. Die gegebenenfalls gegenläufige Berücksichtigung der Neubaugebiete im Datensatz c hat dabei einen zu geringen Einfluss, um diesen Effekt aufzuheben:

$$r_{a,c} > r_{a,d} \rightarrow \text{Hypothese wird bestätigt.}$$

4. Die gebäudegenauen Verteilungen weisen aufgrund ihrer Auflösung und der ähnlichen Methodik eine höhere Korrelation untereinander auf als zu beiden anderen Datenverteilungen:

$$r_{c,d} > r_{a,c} \text{ und } r_{c,d} > r_{a,d} \text{ und } r_{c,d} > r_{b,c} \text{ und } r_{c,d} > r_{b,d}$$

→ Hypothese wird bestätigt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Aufteilung der Bevölkerung auf einzelne Gebäude zu einer deutlich höheren Korrelation zu den Zensus-Daten führt. Dabei erscheint die Aufteilung auf einzelne Gebäude als wesentlich wichtiger als die Berücksichtigung der Gebäudevolumina: Die Unterschiede zwischen $r_{a,c}$ und $r_{a,d}$ erscheinen klein im Vergleich zu dem Unterschied zwischen $r_{a,c}$ und

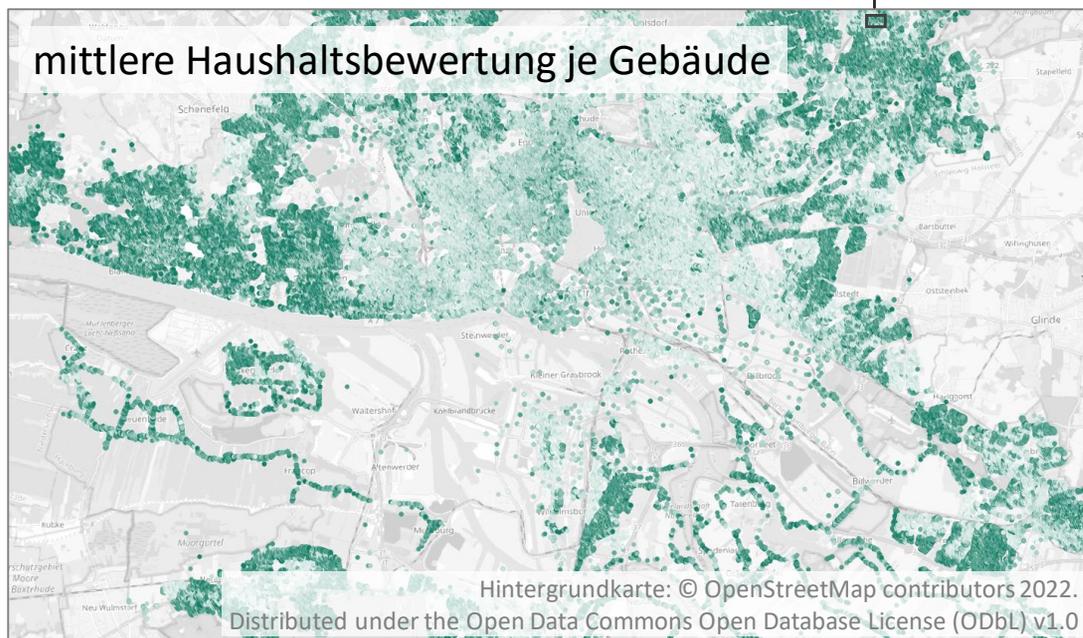
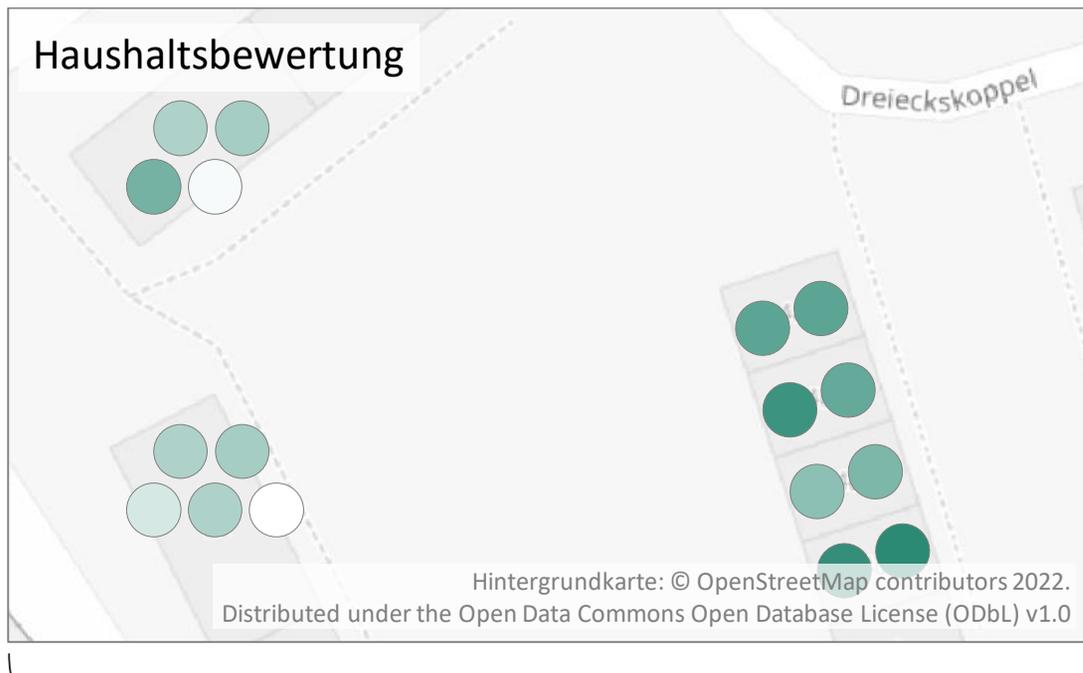
Zusammenfassung
Korrelationsanalyse

$r_{a,b}$. Die erreichte Übereinstimmung mit den Zensusdaten erscheint ausreichend, so dass Methode c valide ist und als Grundlage für die weiteren Schritte genutzt wird.

4.4 Detailregionalisierung: Heimpladen

Haushaltsbewertung

Anhand der in Abbildung 18 dargestellten Attribute wird mit der Nutzwertanalyse eine Bewertung für die einzelnen Haushalte bestimmt, was in Abbildung 20 sowohl für den vorherigen Kartenausschnitt je Haushalt, als auch für ganz Hamburg als Durchschnittsbewertung der Haushalte in jeweils einem Gebäude dargestellt ist.



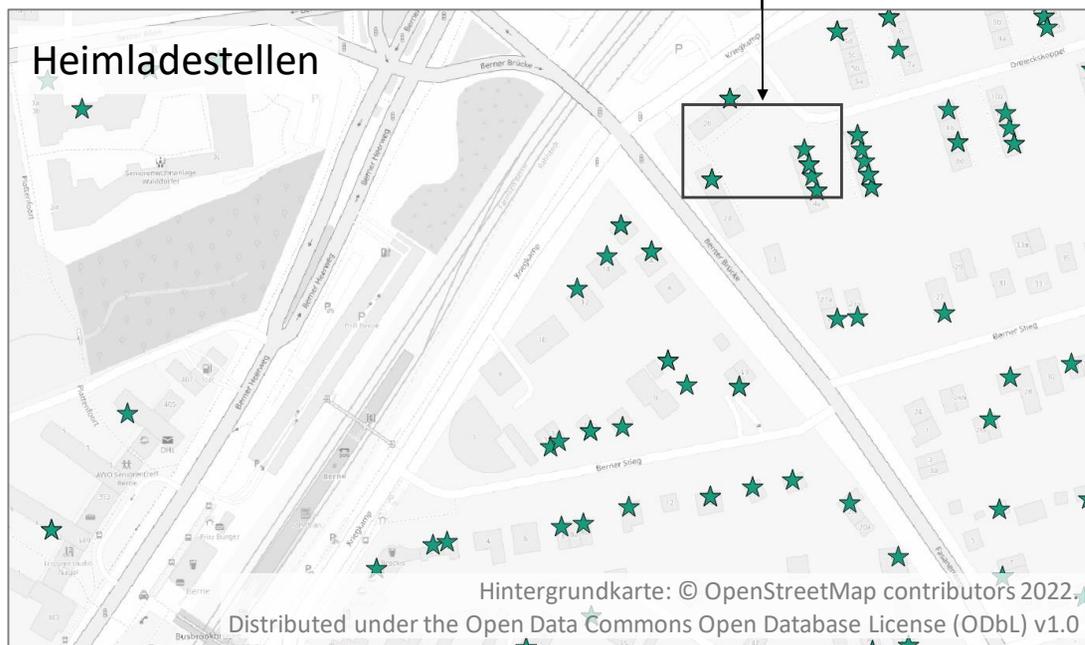
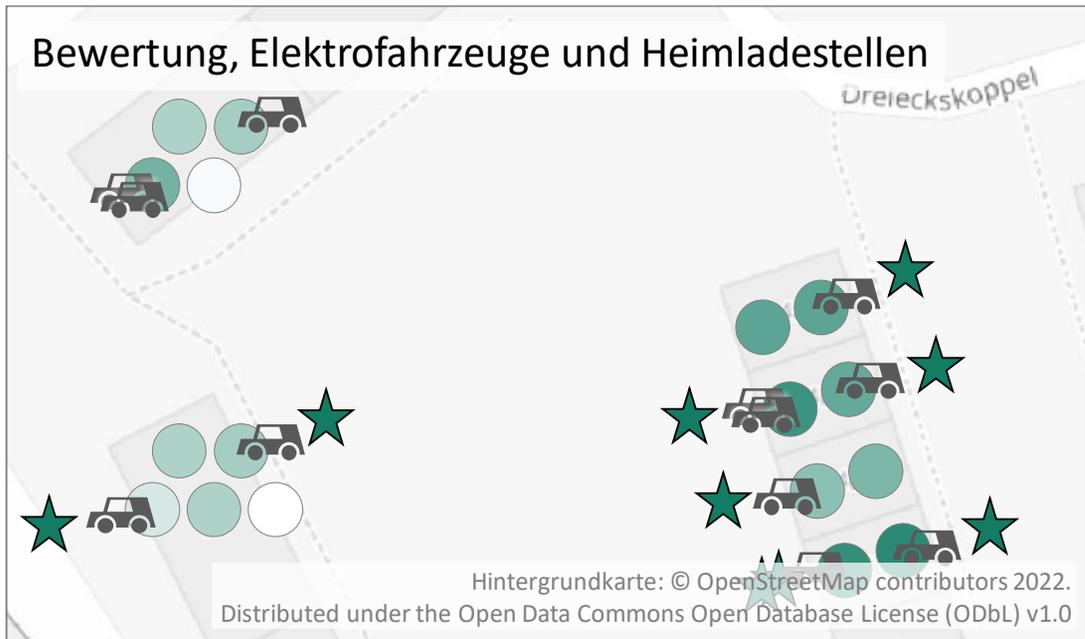
Bewertung aus Nutzwertanalyse [-]:



Abbildung 20: Erster Schritt der Nutzwertanalyse: Haushalte

Gut zu erkennen ist dabei die im Schnitt höhere Bewertung an den Stadträndern, was sich insbesondere auf den geeigneteren Gebäudetyp (mehr Ein- und Zweifamilienhäuser als in Zentrumsnähe) zurückführen lässt.

Die Bewertungen werden anschließend genutzt, um mit einer gewichteten Zufallsziehung eine Verteilung für den Fahrzeugbesitz zu generieren. Für das Beispiel Hamburg werden damit 317.705 Elektrofahrzeuge modelliert, zuzüglich 50% für eine flexible Szenarienbildung. Unter Berücksichtigung der 50 Verteilvarianten werden damit 23,83 Mio. Dateneinträge für Elektrofahrzeuge bereitgestellt, die durch die Verteilvarianten beispielsweise für die spätere Anwendung in einer probabilistischen Netzberechnung verwendet werden können. Im zweiten Schritt wird der Ladestellenbesitz modelliert. Dafür erfolgt eine weitere Zufallsziehung, die wiederum anhand des Gebäudetyps gewichtet ist. Im oberen Teil der Abbildung 21 wird die in der vorherigen Abbildung gezeigten Haushaltsbewertung wieder aufgegriffen und ergänzt um eine Verteilung für Elektrofahrzeuge und Ladestellen. Im unteren Teil ist die Verteilung von Ladestellen für ein größeres Gebiet dargestellt.



- 
Bewertung Nutzwertanalyse [-]: 
- 
Elektrofahrzeug ( für 2 Fahrzeuge in einem Haushalt)
- 
Heimladestelle (unterer Abbildungsteil: Mehrere Fahrzeuge in einem Gebäude sind als einzelner Stern dargestellt)

Abbildung 21: Heimladen: Nutzwert und Zufallsziehung

Zu beachten ist dabei, dass hier eine einzelne Verteilung von Elektrofahrzeugen und Ladestellen grafisch dargestellt ist. Die vorgestellte Methodik kennzeichnet sich dadurch, dass sie sowohl für einen bestimmten Szenariensatz unterschiedliche (zufällige) Verteilungen generieren kann, als auch unterschiedliche Szenarien abbilden kann, beispielsweise über abweichende Gewichtungen.

Datenumfang
Modellergebnisse

Für die oben beschriebene Gewichtung werden 50 Verteilungen generiert, mit jeweils 151.465 Ladestellen (vergleiche Tabelle 13 aus Kapitel 4.2) plus 50% für die flexible Abbildung von Szenarien. Insgesamt werden damit rund 11,36 Mio. Datenpunkte für Heimpladestellen für Hamburg erzeugt.

Korrelationsanalyse

Mit einer Korrelationsanalyse werden die Modelldaten in zwei Schritten validiert. Dafür werden den Modelldaten im ersten Schritt Ist-Daten auf Stadtteilebene [110] gegenübergestellt. So lässt sich feststellen, ob das Modell die erwarteten Korrelationen zu Ist-Daten aufweist. Im zweiten Schritt wird ein alternatives Modell (ein Datensatz der GfK, der die Affinität zur Elektromobilität abbildet [112]) ebenfalls den Ist-Daten gegenübergestellt. So lässt sich feststellen, wie das hier entwickelte Modell im Vergleich abschneidet und welche Unterschiede sich feststellen lassen. Für eine detaillierte Beschreibung der Methodik siehe Kapitel 3.4.3. Es ergeben sich die folgenden Korrelationskoeffizienten in Tabelle 17, die hier entwickelten Modelldaten werden dabei mit dem Index ‚m‘ abgekürzt, die stadtteilweiten Ist-Daten mit den Indizes ‚a‘ bis ‚e‘ und die Vergleichsmodelldaten mit ‚GfK‘:

Tabelle 17: Korrelationskoeffizienten auf Ebene der Stadtteile

Bezeichnung	Indizes	Modell: Bewertung	GfK: Affinität Elektromobilität
		m	GfK
Anteil der Single-Haushalte	a	-0,826	0,770
Anteil der Wohnungen in Ein- & Zweifamilienhäusern	b	0,950	-0,862
Anzahl der Pkw je Haushalt	c	0,946	-0,885
Ist-Anteil der Elektrofahrzeuge	d	-0,112	0,310
Arbeitslosenquote	e	-0,527	0,293

Die Auswertung der Hypothesen 1 bis 3 anhand der zuvor genannten Korrelationskoeffizienten ergibt damit wie folgt:

Auswertung
Hypothesen, Teil I/II

1. Da Single-Haushalte im Modellaufbau zu einer niedrigeren Bewertung und Ein- und Zweifamilienhäuser zu einer höheren Bewertung führen, sind die entsprechenden Zusammenhänge auch auf Stadtteile-Ebene nachweisbar:

$$r_{m,a} < 0 \quad \text{und} \quad r_{m,b} > 0 \quad \rightarrow \text{Hypothese wird bestätigt.}$$

2. Die Anzahl der Pkw je Haushalt und dem bisherigen Anteil der Elektrofahrzeuge weisen einen positiven Zusammenhang zu der im Modell bestimmten Bewertung auf:

$$r_{m,c} > 0 \quad \text{und} \quad r_{m,d} > 0$$

→ Der erste Teil der Hypothese wird für $r_{m,c} = 0,946 > 0$ bestätigt, der zweite Teil mit $r_{m,d} = -0,112 < 0$ nicht.

3. Die Arbeitslosenquote weist einen negativen Zusammenhang zu der im Modell bestimmten Bewertung auf:

$$r_{m,e} < 0 \quad \rightarrow \text{Hypothese wird bestätigt.}$$

Die Hypothesen werden bestätigt, bis auf die vermutete aber nicht erfüllte positiven Korrelation von bisherigen Elektrofahrzeugen in den Stadtvierteln mit den Modellzahlen. Diese sind in dem Kontext der niedrigen bisherigen Anteile von Elektrofahrzeugen zu sehen: Mit 7.021 Elektrofahrzeugen von insgesamt 647.946 Fahrzeugen in den berücksichtigten Stadtteilen sind nur rund 1,1 % der Fahrzeuge Elektrofahrzeuge.

Korrelationsanalyse,
Auswertung

Die Auswertung der Hypothesen 4 bis 7 ergibt:

4. Auch für die GfK-Daten stellt sich ein positiver Zusammenhang zu der Anzahl der Pkw je Haushalt und der Ist-Anzahl der Elektrofahrzeuge her:

$$r_{GfK,c} > 0 \quad \text{und} \quad r_{GfK,d} > 0$$

→ Der erste Teil der Hypothese wird mit $r_{GfK,c} = -0,885 < 0$ nicht bestätigt, der zweite Teil mit $r_{GfK,d} = 0,310 > 0$ schon.

5. Aufgrund der detaillierteren Betrachtung in dem hier entwickelten Modell sind die jeweiligen Korrelationen damit jedoch größer als mit der Affinität der GfK-Daten:

$$r_{m,c} > r_{GfK,c} \quad \text{und} \quad r_{m,d} > r_{GfK,d}$$

→ Der erste Teil der Hypothese wird mit $0,946 > -0,885$ bestätigt, der zweite Teil mit $-0,112 < 0,310$ nicht.

Auswertung
Hypothesen,
Teil II/II

6. Analog weist die Arbeitslosenquote auch zu den GfK-Daten einen negativen Zusammenhang auf, der gegensätzliche Zusammenhang zu dem hier entwickelten Modell ist jedoch stärker:

$$r_{\text{GfK},e} < 0 \quad \text{und} \quad r_{m,e} < r_{\text{GfK},e}$$

→ Der Zusammenhang zwischen der Arbeitslosenquote zu den GfK-Daten ist entgegen der Hypothese positiv, der erste Teil der Hypothese wird damit nicht bestätigt. Der zweite Teil der Hypothese wird bestätigt, da der (mit der Hypothese 3 in Einklang stehende) negative Korrelationskoeffizient $r_{m,e}$ kleiner ist als der positive Korrelationskoeffizient $r_{\text{GfK},e}$.

7. Da beide Modelle einen vergleichbaren Sachverhalt darstellen, haben sie eine positive Korrelation:

$$r_{\text{GfK},m} > 0 \quad \rightarrow \quad \text{Die Hypothese kann nicht bestätigt werden.}$$

Es ist auffallend, dass alle Vorzeichen der Korrelationen von den Modelldaten zu den Stadtteildaten genau umgekehrt sind wie die Korrelationen von den GfK-Affinitäten zu den Stadtteildaten, es gilt also $r_{m,x}/r_{\text{GfK},x} < 0$ (für $x \in \{a;b;c;d;e\}$), siehe Tabelle 17. Trotz der inhaltlich ähnlich gelagerten Fragestellung spiegeln die Werte also keinen ähnlichen Zusammenhang wieder. So ergibt auch der Korrelationskoeffizient von den hier erstellten Modelldaten und der der GfK-Daten eine stark negative Korrelation von $r_{\text{GfK},m} = -0,834$. Dies erscheint zunächst wenig plausibel, weswegen versucht wurde, mögliche Ursachen im Austausch mit GfK zu untersuchen. Eine Fehlinterpretation des Wertespektrums konnte dabei ausgeschlossen werden, eine mögliche Ursache könnte in der nicht inkludierten Gebäudesituation in der GfK-Affinität liegen, die je nach Zielsetzung zusätzlich integriert werden müsste [113]. Weitere Gespräche mit den Modellentwicklern der GfK zur inhaltlichen Untersuchung der stark unterschiedlichen Ergebnisse sind zum jetzigen Zeitpunkt (Ende 2022) geplant, wurden aber noch nicht durchgeführt.

Auf Grundlage der Hypothesenauswertung und [113] wird folgendes Fazit gezogen:

- Eine Fehlinterpretation der Datensätze kann weitestgehend ausgeschlossen werden, Modelldaten und die von GfK genannte Affinität für Elektrofahrzeuge scheinen tatsächlich entgegengesetzte Ergebnisse abzubilden.
- Die Hypothesen zu den Zusammenhängen zwischen Modelldaten und Stadtteildaten a, b, c und e konnten allesamt bestätigt werden und sprechen für eine Validität der Modelldaten für den Anwendungsfall.

- Die Hypothese zu dem Zusammenhang zum Ist-Anteil der Elektrofahrzeuge und den Modelldaten kann nicht bestätigt werden. Vor dem Hintergrund der Analyse in Kapitel 2.3 (vgl. auch Anmerkung zu der Größe in Kapitel 3.4.3) erscheint dies kein kategorischer Widerspruch zu einer Validität der Modelldaten. Zudem ist der Anteil von Elektrofahrzeugen mit 1,1 % gering, interessant wäre eine spätere Auswertung bei steigender Durchdringung.
- Die Daten zu der Affinität für Elektroautos der GfK erscheinen für den Anwendungsfall der räumlichen Verteilung von Elektrofahrzeugen in Szenarien mit den hier geforderten Eigenschaften nicht geeignet: Inhaltlich aufgrund der Korrelationsanalyse und technisch gesehen aufgrund der fehlenden punktgenauen Auflösung. Dies stellt kein Qualitätsurteil über die Daten dar, sondern lediglich eine Auswertung für eine potentielle Anwendung in dem hier erarbeiteten Anwendungsfall.

Die Auswertung der Hypothesen bestätigt damit eine Validität der eigenen Modelldaten für den hier dargestellten Anwendungsfall, also der Verwendung für die Wahrscheinlichkeit eines Elektrofahrzeugkaufs in Zukunft.

4.5 Detailregionalisierung: (halb-) öffentliches Laden

Als Zwischenergebnis für die Detailregionalisierung der (halb-) öffentlichen Ladestellen werden zunächst die Bedarfe nach Ladestellen dargestellt. Der eine Teil des Bedarfs entsteht aus den Elektrofahrzeugen ohne Heimladestelle, insgesamt rund 166.000, vergleiche Tabelle 13 und als verortetes Beispiel die Elektrofahrzeuge im MFH in der Abbildung 21 oben links. Zum anderen ergibt sich ein Bedarf durch Zielorte. Die Auswertung der MiD-Fahrten ergibt die in Tabelle 18 dargestellten am häufigsten angefahrenen Wege-Typen, die nochmal in acht Kategorien (A bis H) zusammengefasst werden:

Tabelle 18: MiD-Fahrten nach Wegezielen [89], Auswertung in [14]

Wege-Typ MiD	Typ-Nr. MiD	Rang nach Häufigkeit	Wege in Großstadt mit Pkw (von allen Wegen)	Kategorie-Zusammenfassung
täglicher Bedarf	501	1	17.662 (37,1 %)	A
Besuch/Treffen von Bekannten	701	2	11.878 (40,2 %)	kein POI
Sport (selbst aktiv)	704	3	6.234 (37,5 %)	E
sonstige Waren	502	4	5.551 (46,6 %)	B
Arztbesuch, andere medizinische Dienstleistungen	601	5	5.212 (40,4 %)	D
sonstiger Erledigungszweck	604	6	4.288 (43,0 %)	B
Restaurant, Gaststätte, Mittagessen, Kneipe, Disco	706	7	4.272 (30,4 %)	F
allgemeiner Einkaufsbummel	503	8	2.973 (37,3 %)	B
Dienstleistungen (Friseur, Schuster etc.)	504	9	2.270 (42,7 %)	C
Einkauf, keine Angabe zum Detail	599	10	2.197 (40,8 %)	B
Hobby (z.B. Musizieren)	717	11	2.024 (36,8 %)	kein POI, Wegeziel vage
Erledigung, keine Angabe zum Detail	699	12	1.912 (38,0 %)	kein POI, Wegeziel vage
Kirche, Friedhof	713	13	1.824 (30,4 %)	G
Besuch einer Veranstaltung (z.B. Fußballspiel, Markt, Popkonzert)	703	14	1.811 (32,8 %)	H

Den Kategorien werden die folgenden Objekte aus OSM zugeordnet, siehe Tabelle 19. Die Größenklassen (siehe Werte in Klammern in der dritten Spalte) werden im Rahmen der Modellierung angenommen und sind als Eingangsgröße variabel.

OSM-Objekte

Tabelle 19: OSM-keys und -values für die POI [14]

Kategorie	OSM key	OSM value (mit angenommener Größenklasse in Klammern)
A	shop	supermarket (2); butcher (1); alcohol (1); bakery (1); greengrocer (1); convenience (1); beverages (2); chemist (2)
	amenity	marketplace (2)
B	shop	doityourself (1); books (1); computer (1); electronics (2); mall (3); bicycle (1); florist (1); garden_centre (2); gift (1); department_store (3); clothes (1); furniture (2); jewelry (1); shoes (1); toys (1); sports (2); mobile_phone (1); pet (1); video (1)
C	craft	photographer; jeweller; locksmith; key_cutter; tailor; dressmaker; shoemaker; clockmaker; hairdresser (alle: 1)
	shop	optician; travel_agency; dry_cleaning; laundry; hairdresser; beauty (alle: 1)
	amenity	veterinary (1)
D	healthcare	pharmacy (1); doctor (1); hospital (3); dentist (1); clinic (3); centre (2)
E	leisure	sports_centre; sports_hall (alle: 2)
	sport	soccer; tennis; basketball; baseball; multi; swimming; golf; equestrian; running; athletics; fitness; beachvolleyball; climbing; volleyball; skateboard; table_tennis; american_football; boules; bowls; motor; shooting; cricket; netball; skiing; gymnastics; rugby_union; horse_racing; motocross; cycling; karting; free_flying; handball (alle: 2)
F	amenity	bar (1); biergarten (2); café (1); ice_cream (1); fast_food (2); pub (2); restaurant (2)
G	amenity	place_of_worship (2)
	building	church (2)
	landuse	cemetery (2)
H	leisure	stadium (3)
	building	stadium (3)
	amenity	concert_hall (3)

Für das Beispiel Hamburg werden 15.438 POI identifiziert, eine abschließende Vollständigkeit der Orte kann dabei nicht garantiert werden, worauf im Folgenden noch eingegangen wird.

Gewichtung
Ladebedarfe

Die Gesamtpunktzahl für die Bedarfe wird a priori auf die Anzahl der Ladestellen festgelegt. Diese Gesamtpunkte werden in drei Schritten auf einzelne Objekte aufgeteilt, womit die Bedarfe quantifiziert werden, siehe Methodikbeschreibung in Kapitel 3.5.2. Zusammenfassend werden im ersten Schritt die Punkte hälftig auf die zwei Gruppen ‚Bedarf durch Fahrzeuge ohne Heimlademöglichkeit‘ und ‚POI‘ aufgeteilt. Für die Fahrzeuge ergibt sich damit direkt aus dieser Bewertung und der Anzahl der Fahrzeuge eine Bewertung je Einzelobjekt. Für die POI folgt im zweiten Schritt eine Aufteilung in die POI-Kategorien entsprechend der Anfahrtshäufigkeit der Kategorie in Tabelle 18. Im dritten Schritt werden die Punkte der POI-Kategorie auf einzelne POI aufgeteilt, dabei werden für die drei verschiedenen Größenklassen unterschiedliche Größenfaktoren genutzt, die im Modell variiert werden können. Sie werden hier abgeschätzt mit 1; 5 und 25. Anhand folgender zwei Beispiele wird dieser zweifache Faktor von 5 plausibilisiert: Im Bereich Gesundheitswesen könnten beispielsweise je Stunde 6 Patienten zu einer kleineren Arztpraxis kommen. Für ein Ärztehaus erscheinen 30 Patienten pro Stunde realistisch, und für eine große Klinik erscheinen 150 Patienten und Besucher pro Stunde plausibel. Auch für Einkaufsmöglichkeiten, für die nur die Größenklassen 1 und 2 genutzt werden (vergleiche Tabelle 19) erscheint ein Faktor 5 für den Unterschied der Kunden, die mit dem Auto kommen plausibel, beispielsweise zwischen einem Metzger und einem Supermarkt.

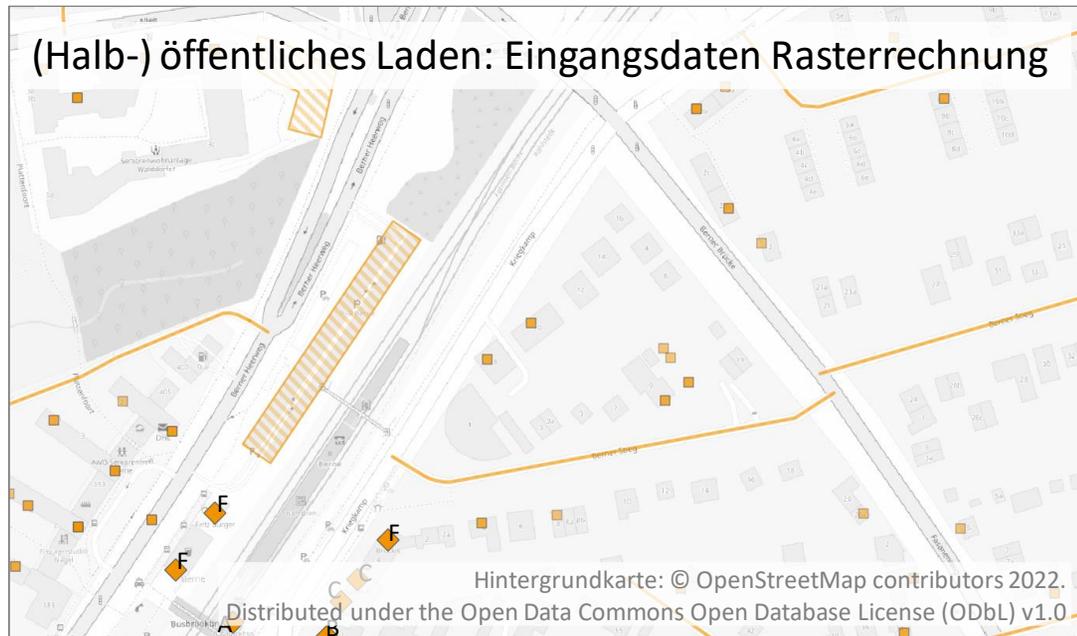
Es ergibt sich folgende Quantifizierung der Bedarfe je Gruppe und je Einzelobjekt, siehe Tabelle 20:

Tabelle 20: Bedarf öffentl. Laden Hamburg, vgl. analog [14] für Wiesbaden

Schritt 1: Aufteilung in Bedarfstypen						
	Punkte	Anteil				
Gesamtbedarf	14.487,00	100,0 %				
B. durch Fahrz. ohne Heimlademöglichk.	7.243,50	50,0 %	je Fahrzeug: 0,044			
Bedarf durch POI	7.243,50	50,0 %				
Schritt 2: Aufteilung in POI-Kategorien				Schritt 3: Punkte je POI in:		
				Größen- klasse 1	Größen- klasse 2	Größen- klasse 3
POI-Kategorie	A	2329,86	16,08 %	0,456	1,821	
	B	2061,28	14,23 %	0,484	1,938	5,811
	C	299,44	2,07 %	0,175		
	D	687,53	4,75 %	0,398	1,586	4,757
	E	822,35	5,68 %		0,301	
	F	563,53	3,89 %	0,035	0,147	
	G	240,61	1,66 %		0,466	
	H	238,89	1,65 %			14,052

Wie vorhergehend erwähnt, kann eine Vollständigkeit der einzelnen Objekte nicht garantiert werden, der mögliche Fehler verbleibt durch die schrittweise Aufteilung der Bewertung innerhalb der jeweiligen Kategorie, da die Aufteilung in die Kategorien anhand der MiD-Daten erfolgt und von lokalen Daten (wie den OSM-Daten) unabhängig ist.

Neben den Bedarfen für die öffentlich zugänglichen Ladestellen stellen die Parkplatzpotentiale ein weiteres Zwischenergebnis dar. Genau wie die Bedarfe liegen sie zunächst vektor- bzw. objektbasiert vor, siehe Abbildung 22.

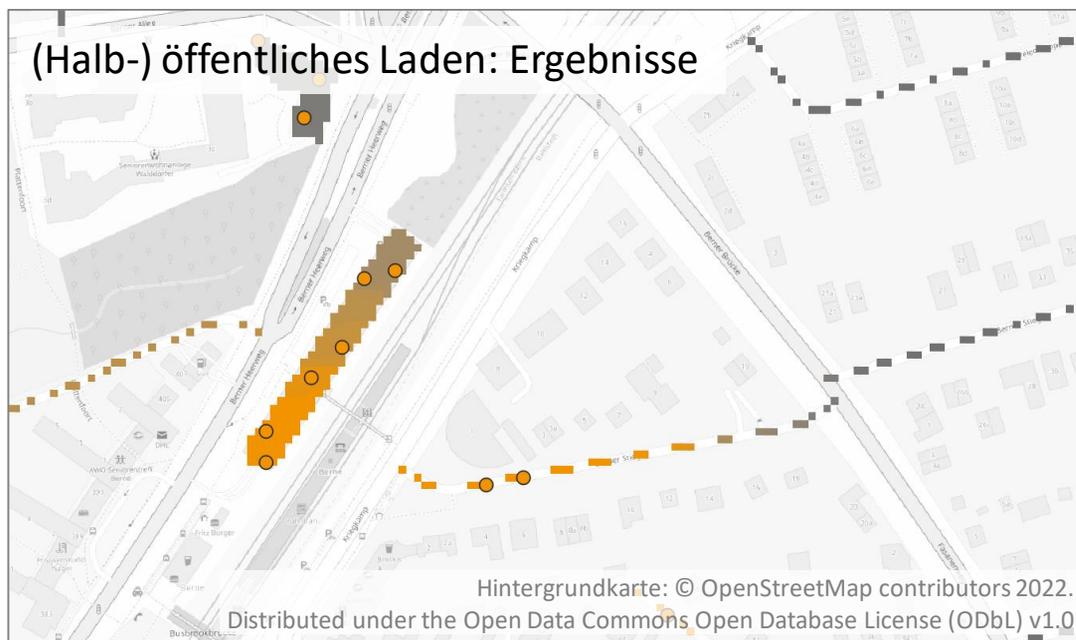


- Bedarf durch Elektrofahrzeug (Deckkraft nach Anzahl: ■ 1x ■ 3x)
- ◆ A Bedarf durch POI mit Kategorie
- ▨ Parkplatz
- (gepufferte Parkplätze an Straßen ergeben schmale Flächen)

Abbildung 22: Eingangsdaten Rasterrechnung für (halb-) öffentliches Laden

Anhand der Rasterung und der Aufteilung auf Parkplätze ergibt sich eine Bewertung einzelner Parkplatz-Rasterpixel, die jeweils einen Parkplatz repräsentieren. Diese Bewertung wird als Grundlage für eine gewichtete Zufallsziehung der öffentlich zugänglichen Ladestellen genutzt, siehe Abbildung 23.

Ergebnisse der
Rasterrechnung



■ Bedarf Ladestellenanzahl je Parkplatz:



● (halb-) öffentliche Ladestelle

Abbildung 23: Ergebnisse Rasterrechnung für (halb-) öffentliches Laden

Die in der Methodik getroffene Annahme eines Anteils von 0,3 der Straßenlänge, der für Parkraum zur Verfügung steht, ist damit valide, da das Potential nicht ausgeschöpft wird. Ein größerer Anteil, damit ein breiter Puffer und damit mehr Parkflächen bzw. Pixel an Straßen würden hier also keinen essentiellen Unterschied in der Ladestellenverteilung ergeben, da die Bedarfe auf die Parkflächen aufgeteilt werden.

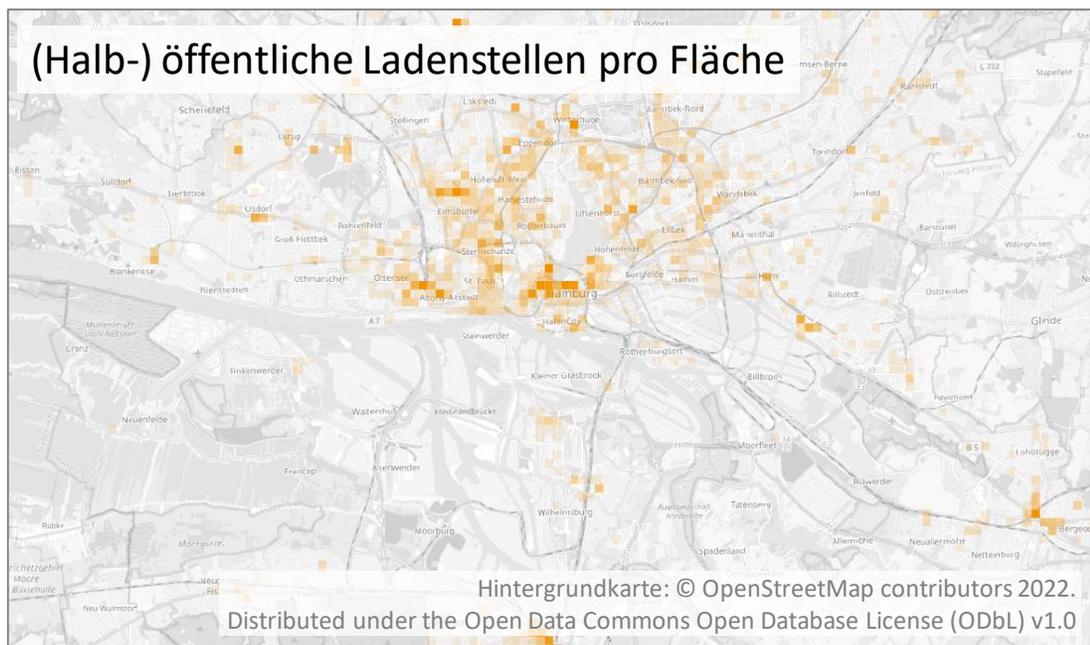
Wie auch schon für die Heimladestellen werden auch für die (halb-) öffentlichen Ladestellen mehrfach Verteilungen erstellt, um probabilistische Netzberechnungen zu ermöglichen. Es werden 50 verschiedene Verteilungen mit jeweils 14.487 Ladestellen (vergleiche Tabelle 13 aus Kapitel 4.2) erstellt. Darüber hinaus werden in jeder dieser Verteilungen +50 % zusätzlichen Ladestellen für die flexible

Datenumfang
Modellergebnisse

Abbildung von Szenarien erstellt. Insgesamt ergeben sich damit rund 1,09 Mio. Datenpunkte für öffentlich zugängliche Ladestellen für Hamburg.

Analyse
großräumige
Verteilung

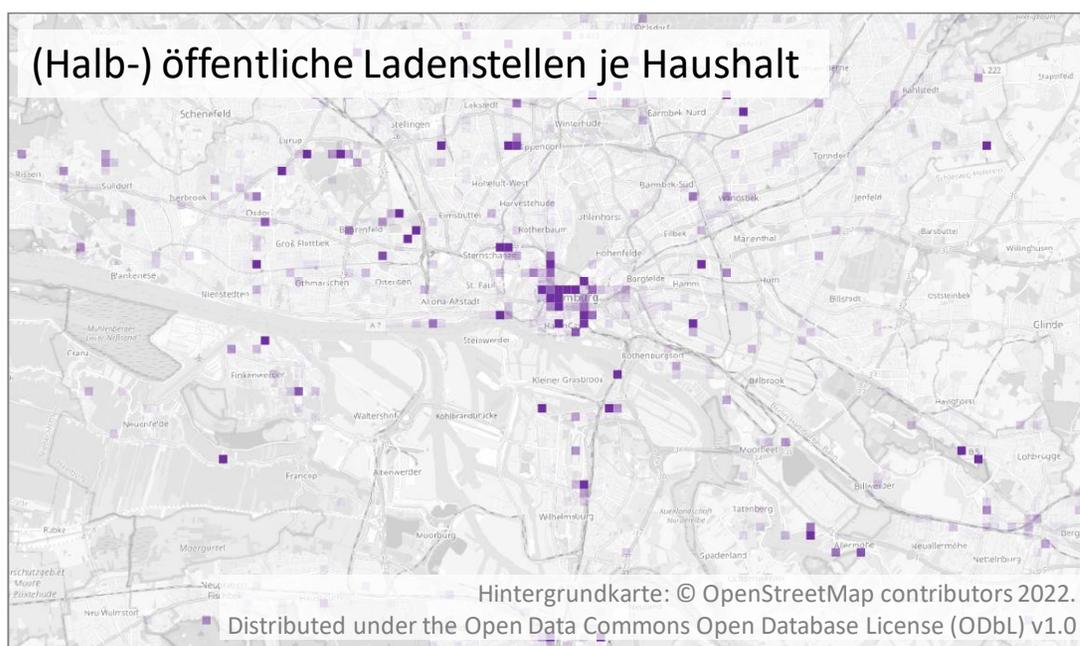
Zur Visualisierung der großräumigen Verteilung über Hamburg sind in der folgenden Abbildung 24 die (halb-) öffentlichen Ladestellen pro Fläche und in Abbildung 25 die (halb-) öffentlichen Ladestellen je Haushalt dargestellt. Gut zu erkennen ist eine höhere Ladestellendichte in zentrumsnahen Gebieten, entgegengesetzt und ausgleichend zu der Verteilung von Heimladestellen, vergleiche Abbildung 20.



■ Dichte der (halb-) öffentlichen Ladestellen:



Abbildung 24: (Halb-) öffentliche Ladestellen pro Fläche, Hamburg



■ Anzahl (halb-) öffentliche Ladestellen je Haushalt:

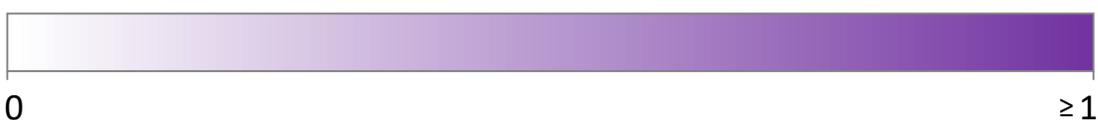


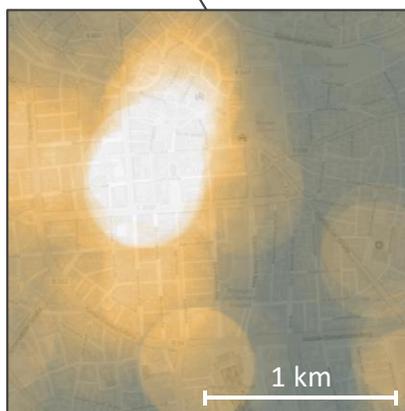
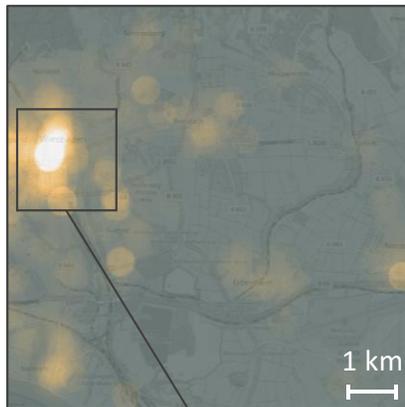
Abbildung 25: (Halb-) öffentliches Laden je Haushalt, Hamburg

Zur Validierung des Modells für öffentliche Ladestellen wurde ein Zwischenergebnis der Modellkette – die räumliche Bewertung – in einem Verfahrensvergleich in [14] untersucht. Dem im Rahmen der Arbeit entwickelten Modell werden drei andere Modelle bzw. Verfahren gegenübergestellt, siehe Kapitel 3.5.5.

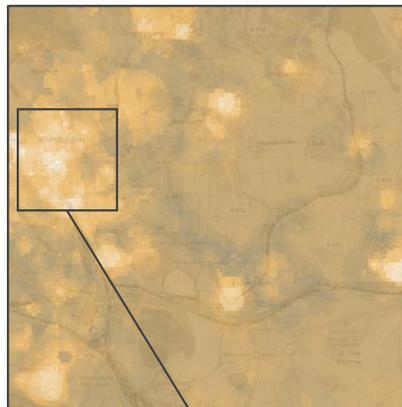
Verfahrensvergleich

Die Bewertungen des eigenen Modells, des dritten und des vierten Verfahrens sind in Abbildung 26 dargestellt. Verfahren 2 ähnelt dem ersten Verfahren stark, die Ergebnisse sind optisch auf dieser Verkleinerung kaum zu unterscheiden, auf eine Darstellung in der Abbildung 26 wurde deswegen verzichtet. Wie in Kapitel 3.5.5 genannt, beziehen sich die Ergebnisse des Verfahrensvergleichs aufgrund der Datenverfügbarkeit des KI-Verfahrens auf Wiesbaden und nicht auf das sonst in der Arbeit betrachtete Anwendungsgebiet Hamburg.

**Verfahren 1:
Eigenes Modell**



**Verfahren 3:
KI-Verfahren**



**Verfahren 4:
Abstandsmodell**



Hintergrundkarten: © OpenStreetMap contributors 2022.
Distributed under the Open Data Commons Open Database License (ODbL) v1.0

Bewertungen:

Verfahren 1:
Bewertungspunkte [-]



Verfahren 3:
Auslastung [h]



Verfahren 4:
Bewertungspunkte [-]



Skala reicht jeweils von Minimal- bis Maximalwert des gesamten Datensatzes

Abbildung 26: Verfahrensvergleich (halb-) öffentliches Laden, Wiesbaden

In Kapitel 3.5.5 wurden vier Fragen gestellt, deren Beantwortung (vgl. jeweils mit Abbildung 26) Rückschlüsse auf die Qualität der Verfahren zulassen:

Auswertung der
qualitativen Fragen

- Werden städtische Gebiete und Randgebiete in der Bewertung unterschieden?
→ Ja, Verfahren 1 bis 3 unterscheiden diese Gebiete. Siehe dafür Abbildung 26 unten/links und unten/mittig. Das vierte Verfahren tut das nicht, naturgegebener Maßen aufgrund des trivialen-Ansatzes.
- Besteht eine Heterogenität der Bewertung im Betrachtungsgebiet?
→ Ja, Verfahren 1 bis 3 weisen eine Heterogenität der Bewertung auf. Siehe dafür Abbildung 26 oben/links und oben/mittig: Die gesamte Spannbreite der Bewertungen wird heterogen in verschiedenen Gebieten abgebildet. Bei Verfahren 4 ist eine Heterogenität nur bedingt gegeben: Zwar werden definitionsgemäß unterschiedliche Werte abgebildet, allerdings jedoch in einem linearen, also homogenen, Verlauf.
- Besteht eine mittlere Granularität der Ergebnisse?
→ Ja, die Verfahren 1 bis 3 bilden, bezogen auf unterschiedliche Stadtgebiete, eine mittlere Granularität in den Ergebnissen ab. Für den Anwendungsfall, die Ballung von Ladestellen in bestimmten Stadtgebieten und Netzen zu untersuchen, erscheint diese Granularität damit grundsätzlich geeignet. Für die Granularität von Verfahren 3 siehe die Abbildung 26 unten/mittig, bei der einzelne Pixel in der Größenordnung von Stadtgebieten/Straßenzügen deutlich unterschieden werden. Auch Model 1 (vergleiche Abbildung 26 oben/links und unten/links) und Model 2 bilden eine Granularität auf Ebene von Stadtgebieten ab, gleichwohl zeigen sich durch den Abstand zum POI harte Kanten in den Ergebnissen, die als solche Grenze nicht plausibel erscheinen. Dies ließe sich grundsätzlich durch eine Abbildung der Abstände von POI als Gradienten in der Bewertung verbessern, ist aber gegen eine mögliche Pseudogenauigkeit abzuwägen. Verfahren 4 bildet keine sinnvolle Granularität ab.
- Wird eine plausible Bandbreite an Bewertungsergebnissen abgebildet?
→ Teilweise. Die Modelle 1, 2 und 4 bilden eine formal plausible Bandbreite von Ergebnissen mit der Spannbreite von 0 bis zum jeweils plausiblen Maximalwert der Bewertung ab. Das Verfahren 3 tut das nicht: Auch sehr abgelegene Gebiete ohne Straßenanbindung oder Nähe zu Siedlungen weisen eine virtuelle Ladeauslastung von über einer Stunde auf.

Die oben genannten Antworten werden in der folgenden Tabelle 21 zusammengefasst. Die Symbolisierung (-- bis ++) ist dabei qualitativ und nicht mathematisch ableitbar, zur inhaltlichen Bewertung siehe die oben genannte Analyse.

Tabelle 21: Verfahrensvergleich qualitative Aspekte

Nr.	Name	Unterscheidung Gebiete?	Heterogenität vorhanden?	Mittlere Granularität?	Plausible Bandbreite?
1	eigenes Modell	++	++	+	++
2	vereinfacht	++	++	+	++
3	KI-Verfahren	++	++	++	-
4	Abstandsmodell	-	-	--	++

++ erfüllt

+ erfüllt mit kleineren Einschränkungen

- teilweise erfüllt mit Einschränkungen

-- nicht erfüllt

Die durchgeführte Korrelationsanalyse ergibt, wie in [14] publiziert, die folgenden Korrelationskoeffizienten, siehe Tabelle 22:

Tabelle 22: Verfahrensvergleich Korrelationskoeffizienten [14]

	Verfahren 1: eigenes Modell	Verfahren 2: vereinfacht	Verfahren 3: KI-Verfahren	Verfahren 4: Abstandsmodell
Verfahren 1: eigenes Modell	1,000	0,999	0,399	0,299
Verfahren 2: vereinfacht	0,999	1,000	0,394	0,300
Verfahren 3: KI-Verfahren	0,399	0,394	1,000	0,178
Verfahren 4: Abstandsmodell	0,299	0,300	0,178	1,000

Die in Kapitel 3.5.5 aufgestellten Hypothesen können damit wie folgt bestätigt werden:

1. Hypothese: Aufgrund des ähnlichen Modellaufbaus ähneln sich die Ergebnisse von Nr. 1 und Nr. 2 stärker als die Ergebnisse von Nr. 1 (oder Nr. 2) und Nr. 3:

$$r_{1,2} > r_{1,3} \quad (\text{und } r_{1,2} > r_{2,3})$$

→ Hypothese wird bestätigt. Auffallend ist dabei, wie viel stärker sich die Ergebnisse von Verfahren 1 und 2 ähneln als die Ergebnisse von Verfahren 1 und 3 oder Verfahren 2 und 3.

2. Hypothese: Da die Verfahren 1 bis 3 alle dezidierte räumliche Daten wie POI nutzen, sind die Ergebnisse von Nr. 1 bis Nr. 3 untereinander ähnlicher, als die Ergebnisse Nr. 1 bis Nr. 3 im Vergleich zu Nr. 4:

$$r_{x,y} > r_{x,4} \quad (\text{für } x, y \in \{1;2;3\})$$

→ Hypothese wird bestätigt. Auffallend ist allerdings, dass die Korrelation der Verfahren 1 und 3 (oder 2 und 3) mit nur geringem Abstand größer ist als die Korrelation der Verfahren 1 bis 3 mit dem Verfahren 4, also dem trivial aufgebauten Abstandsmodell. So hätte man aufgrund der jeweils vergleichbaren Eingangsdaten mit dezidiert berücksichtigter Bevölkerungsstruktur (mit unterschiedlichen, aber inhaltlich vergleichbaren Quellen in Verfahren 1 bis 3) und POI (in Verfahren 1 bis 3 aus OSM) einen größeren Abstand $r_{1,3} \gg r_{1,4}$ erwarten können, der so nicht bestätigt werden kann.

Die mit kleineren Einschränkungen positiv beantworteten qualitativen Fragen und die bestätigten Hypothesen zeigen die Validität des hier entwickelten Modells für den genannten Anwendungsfall, wobei folgende Erkenntnisse berücksichtigt werden sollten:

Analyse der Eignung

- Die Berücksichtigung ähnlicher Einflussgrößen alleine sorgt noch nicht für die Erzeugung ähnlicher Modellergebnisse. So zeigt der direkte Vergleich von Verfahren 1 und 3 mit einem Korrelationskoeffizienten von rund 0,399 keine viel größere Korrelation als der Vergleich von Verfahren 1 und 4 mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,299.
- Ist die holistische Kopplung von Heimladestellen und öffentlichen Ladestellen zwar für die Veranschaulichung und Nachvollziehbarkeit hilfreich, lassen sich quantitativ nur minimale Unterschiede abbilden: So bildet sich ein Korrelationskoeffizient von 0,999 zwischen dem 1. und 2. (vereinfachten) Modell.

Trotzdem zeigt gerade der Verfahrensvergleich die Stärken des hier entwickelten Modells:

- Im Sinne der Zielsetzung wird ein Werkzeug geschaffen, um weitergehende Erkenntnisse über Zusammenhänge zu schaffen. Dies ist im Vergleich bei einem KI-Verfahren aufgrund des Black-Box-Charakters so nicht möglich.

- Trotz der im KI-Verfahren genutzten deutlich breiteren Datenbasis ergeben sich unplausible Bewertungen für abgelegene Gebiete. In dem hier entwickelten Modell werden diese unplausiblen Bewertungen in abgelegenen Gebieten nicht erzeugt.

4.6 Schnittstelle und Szenarienbildung

Entsprechend der zuvor genannten Grundsätze stehen die Verteilungen in jeweils 50 Varianten zur Verfügung, womit probabilistische Netzberechnungen durchgeführt werden können. Zusätzlich stehen 50 % mehr Ladestellen zur Verfügung, als es die gemeindeweite Regionalisierung für das Basisszenario vorgibt, womit eine flexible Szenarienbildung möglich ist.

Datenumfang
Modellergebnisse

Insgesamt enthält die PostGIS-Datenbank in dem in Tabelle 11 dokumentierten Format 11,36 Mio. Dateneinträge für Heimpladestellen (siehe Kapitel 4.4) und 1,09 Mio. Dateneinträge für (halb-)öffentliche Ladestellen (siehe Kapitel 4.5) für das Anwendungsgebiet Hamburg. Im Rahmen des Projektes „Ladeinfrastruktur 2.0“ wurden zudem weitere Anwendungsgebiete modelliert, bei denen insgesamt 27 Gemeinden betrachtet wurden.

Verknüpfbarkeit mit
weiteren Daten

Diese Ladestellen lassen sich wiederum über eindeutige Schlüssel effizient mit einem Teil der 23,83 Mio. Dateneinträge für Elektrofahrzeuge in Hamburg verknüpfen, die ebenfalls als 50-fache Varianten vorliegen. Sie sind zugeordnet zu den 1,02 Mio. Dateneinträgen für Haushalte und damit den rund 0,27 Mio. Dateneinträgen für Gebäude. Haushalts- und Gebäudedaten sind dabei unabhängig von den 50 Varianten und existieren damit nur einfach.

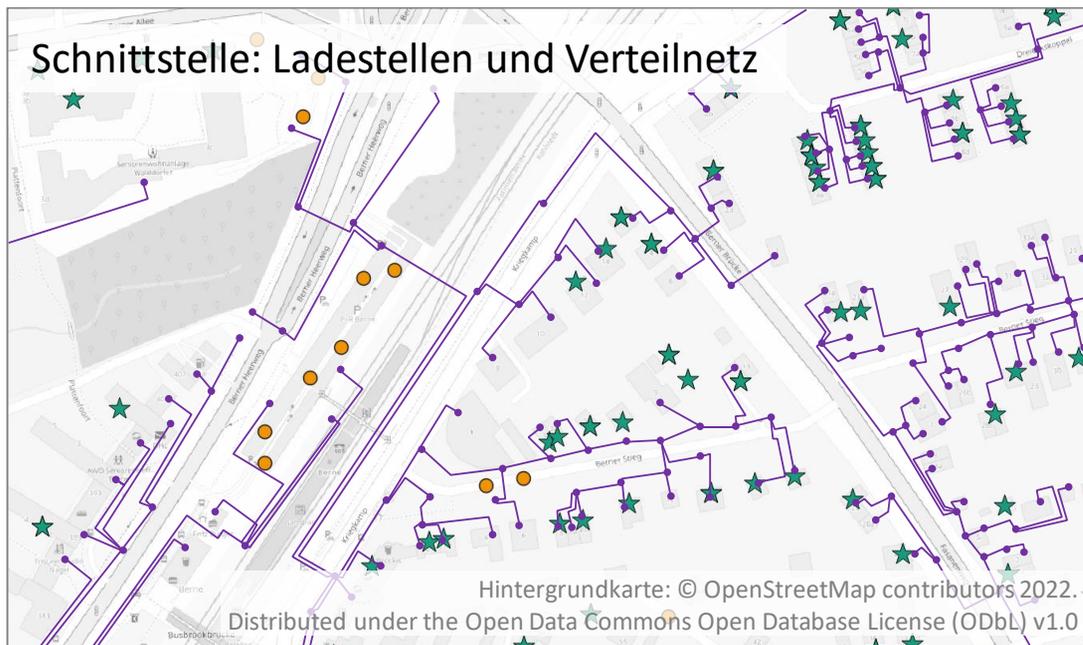
Des Weiteren sind die Daten mit weiteren Datensätzen für Erzeuger und Verbraucher in Hamburg zusammenführbar, die im Rahmen des Projektes „Ladeinfrastruktur 2.0“ erstellt wurden. Dies sind im Einzelnen:

- Ladestellen für Firmenladen: 9,66 Mio. Datensätze, erstellt vom Autor der vorliegenden Arbeit
- PV-Anlagen: 11,63 Mio. Datensätze, erstellt von HORST, vgl. Methodik [125]
- Wärmepumpen: 7,92 Mio. Datensätze, erstellt von STAPPEL [nicht veröffentlicht].

Damit lassen sich flexibel Szenarien für unterschiedliche Zwischenjahre und verschiedene Schwerpunkte der Ladestellen abbilden, beispielsweise der vermehrte Ausbau öffentlicher Ladeinfrastruktur. Zentral für die Abbildung von Zwischenjahren ist dabei auch die Berücksichtigung der Reihenfolge des Zubaus, vergleiche Tabelle 11.

Zubaureihenfolge

Die punktgenaue Verortung ermöglicht zudem eine präzise Zuordnung zu Netzanschlusspunkten, veranschaulicht in der folgenden Abbildung 27.

Schnittstelle zur
Netzberechnung

★ Heimladestelle

● ((halb-)öffentliche Ladestelle

— Verteilnetz: Netzstränge und Anschlusspunkte
(aus Datenschutzgründen sind nicht die echten Verteilnetze dargestellt)

Abbildung 27: Schnittstelle: Regionalisierte Ladestellen und Verteilnetz

Die punktgenaue Verortung bietet dabei für die Netzberechnung eine erhebliche Genauigkeitssteigerung im Vergleich zu einer Auflösung auf Straßenzugsebene, wie in [13] gezeigt werden konnte.

Mehrwert der
punktgenauen
Auflösung

4.7 Zusammenfassung der Modellergebnisse

Die Regionalisierung auf Gemeindeebene ergibt die Anzahl von Elektrofahrzeugen und Ladestellen für jede Gemeinde in Deutschland. Grundlage für die Bestimmung ist unter anderem die Modellierung der gemeindeweiten demografischen Änderung. Sie ist für das Anwendungsgebiet Hamburg mit einem Bevölkerungszuwachs von 10,2 % von 2017 bis 2040 überdurchschnittlich (Bundesdurchschnitt: -6,2 %). Gleichzeitig sorgen niedrige Pkw-Zulassungszahlen und Pendlerzahlen für einen niedrigen Wert von 0,159 Elektrofahrzeugen pro Einwohner im Jahr 2040 (Bundesdurchschnitt: 0,311). Kern der Ergebnisse sind die punktgenau modellierten Ladestellen für die Bereiche Heimpladen und (halb-) öffentliches Laden. Für das Anwendungsgebiet Hamburg werden dafür jeweils 50 räumliche Verteilungen an Ladestellen generiert, womit die Weiterverwendung für probabilistische Netzberechnungen gewährleistet wird. Die Heimpladestellen zeichnen sich dabei insbesondere durch eine Verknüpfung mit sozioökonomischen Daten, Haushalts- und Gebäudedaten aus. Grundlage ist die modellierte Bevölkerungsverteilung auf Haushaltsebene einschließlich der Wohnsituation. Die modellierten öffentlichen Ladestellen zeichnen sich insbesondere durch eine Berücksichtigung der POI und der Abbildung von verfügbarem Parkraum aus. Modellvergleiche und die Hypothesenauswertung von Korrelationsanalysen bestätigen die Validität des Modells in verschiedenen Zwischenergebnissen: So kann die Validität der Bevölkerungsverteilung anhand eines Modellvergleichs unter anderem mit Zensus-Daten bestätigt werden. Die modellierten Elektrofahrzeug-Eignungen einzelner Haushalte werden stadtteilweiten Statistiken gegenübergestellt. Dabei wird durch die (weitgehende) Bestätigung der Hypothesen und eine vertiefte Analyse die Validität der Elektrofahrzeug-Eignungen bestätigt. Auch die räumliche Verteilung des Ladebedarfs für öffentlich zugängliche Ladestellen kann validiert werden und zeigt Vorteile gegenüber einem Vergleichsverfahren, insbesondere bei der Abbildung realistischer Minimalwerte der Bewertung. Die modellintegrative Verknüpfung von Ergebnissen der Heimpladestellen für die Modellierung der öffentlichen Ladebedarfe hingegen zeigt keinen großen quantitativen Mehrwert. Über die erarbeitete Schnittstelle in einer PostGIS-Datenbank stehen für das Anwendungsgebiet Hamburg insgesamt 11,36 Mio. Dateneinträge für Heimpladestellen und 1,09 Mio. Dateneinträge für (halb-) öffentliche Ladestellen zur Verfügung, aus denen flexibel Szenarien zusammengestellt werden können.

5 Fazit und Schlussfolgerungen

5.1 Zusammenfassung

Der Klimawandel verursacht erhebliche Risiken, die Reduzierung von Treibhausgasemissionen ist damit eine zentrale Aufgabe der gesamten Weltbevölkerung. Ein wesentlicher Baustein zur Senkung der CO₂-Emissionen im Verkehrsbereich ist die deutlich gesteigerte Elektrifizierung dieses Sektors, wobei eine schnell wachsende Ladeinfrastruktur Auswirkungen auf das Stromnetz hat. Die Netzberechnungen erfordern die räumliche Verortung von möglichen zukünftigen Ladestellen. Die vorliegende Arbeit schafft ein wertvolles Werkzeug dafür.

Zusammenfassung
Motivation und
Zielsetzung

Das Modell ist in Teilmodellen strukturiert, die zunächst auf Gemeindeebene den demografischen Wandel und die Anzahl an möglichen zukünftigen Elektrofahrzeugen und Ladestellen bestimmen. Fokus der Arbeit ist die Detailregionalisierung, bei der in einzelnen Modellteilen die Bevölkerungsstruktur, der Fahrzeugbesitz, die Heimpladestellen und die öffentlich zugänglichen Ladestellen jeweils punktgenau modelliert werden. Durch diese Modularisierung ist das Modell schrittweise prüfbar und ermöglicht eine passgenaue Weiterentwicklung.

Zusammenfassung
Modellstruktur

Die Modellierung des demografischen Wandels ist Grundlage sowohl für die Zuteilung auf Gemeindeebene als auch für spätere Schritte im Bevölkerungsmodell. Es werden jährlich rollierend Geburten, Sterbefälle und Zu- und Abwanderungen modelliert. Dabei werden sowohl die Einflüsse der bestehenden Altersstruktur, als auch der Region berücksichtigt. Für das Beispiel Hamburg ergibt sich von 2017 bis 2040 einen Bevölkerungszuwachs von 10,2 %, der im Gegensatz zu einem bundesweiten Bevölkerungsrückgang von 6,2 % im selben Zeitraum steht. Die modellierten Entwicklungen der Gemeinden spiegeln auch von anderen Studien aufgezeigte Tendenzen wie die Zunahme der Bevölkerung in Großstädten und die besonders starke Abnahme der Bevölkerung in den neuen Bundesländern wider.

Zusammenfassung
Demografischer
Wandel

Anhand der demografischen Entwicklung, den Fahrzeugmeldezahlen und einem Faktor für die Pendlersituation wird auf Gemeindeebene die Anzahl von Elektrofahrzeugen und Ladestellen für das Jahr 2040 bestimmt. Für Hamburg ergeben sich rund 318.000 Elektrofahrzeuge, rund 151.000 Heimpladestellen und rund 14.000 öffentlich zugängliche Ladestellen. Mit 0,159 Elektrofahrzeugen pro Einwohner im Jahr 2040 liegt das deutlich unter dem bundesweiten Durchschnitt von 0,311, was insbesondere durch die unterdurchschnittlichen Ist-Zulassungszahlen Hamburgs bedingt ist.

Zusammenfassung
Fahrzeug- und
Ladestellenanzahl

Zusammenfassung Bevölkerungs- struktur

Als Grundlage für eine punktgenaue Verteilung von Ladestellen werden einzelne Haushalte inklusive sozioökonomischer Attribute und einer genauen räumlichen Verortung modelliert. Unter Verwendung von räumlichen und statistischen Zuteilungsvarianten wie beispielsweise einem Iterative-Proportional-Fitting-Algorithmus werden mehrere Datenquellen wie die Einkommensverhältnisse, Haushaltstypen (wie ‚Single-Haushalt‘) und Gebäudeeigenschaften (wie das Volumen) zusammengeführt, um eine synthetische Bevölkerung zu erstellen, die Attributkombinationen realistisch abbildet. Es wird eine Korrelationsanalyse von modellierten und im Zensus erhobenen Bevölkerungsverteilungen durchgeführt. Diese bestätigt die Qualität der räumlichen Zuteilung, unter anderem durch einen hohen Korrelationskoeffizienten von 0,874 der Zensusdaten zur modellierten Bevölkerung, die im selben Raster wie die Zensusdaten summiert ist. Unter Berücksichtigung zusätzlicher Haushalte durch das Bevölkerungswachstum im Beispiel Hamburg werden so 1,02 Mio. Haushalte in rund 0,27 Mio. Gebäuden für 2040 modelliert.

Zusammenfassung Heimladen

Die Haushalte bilden die Grundlage für eine Nutzwertanalyse, die auf vier sozioökonomischen Attributen aufbaut: Einkommen, Haushaltstyp, Gebäudetyp und Geschlecht der Person mit höchstem Einkommen im Haushalt. Diese Nutzwertanalyse bildet relative Wahrscheinlichkeiten für die Anschaffung eines Elektrofahrzeugs in den Haushalten. Diese werden wiederum genutzt, um einer wiederholten, gewichteten Zufallsziehung eine räumliche Verteilung von Elektrofahrzeugen inklusive der Zubaureihenfolge zu erstellen. Für das Beispiel Hamburg werden damit rund 318.000 Elektrofahrzeuge, zuzüglich 50% für eine flexible Szenarienbildung, modelliert. Die Verteilung ist konkreten Haushalten zugeordnet und wird 50-fach wiederholt, beispielsweise für die spätere Anwendung in einer probabilistischen Netzberechnung. Insgesamt werden damit 23,83 Mio. Dateneinträge von Elektrofahrzeugen für das Beispiel Hamburg bereitgestellt. In einem zweiten Schritt werden unter Berücksichtigung einer unterschiedlichen Eignung der Gebäudetypen Verteilungen für Ladestellen erstellt: wiederum 50 Verteilvarianten zu je rund 151.000 Ladestellen plus 50% für die flexible Abbildung von Szenarien. Insgesamt werden damit rund 11,36 Mio. Datenpunkte für Heimladestellen für das Beispiel Hamburg generiert. Die Ladestellen sind anhand der Zuordnung zu einem Haushalt präzise einem Ort zugeordnet. Der zugeordnete Haushalt bietet zudem Informationen über die Sozioökonomik. Der Zwischenschritt der Haushaltsbewertungen wird anhand einer Korrelationsanalyse validiert. Mit stadtteilweiten Ist-Daten für Hamburg werden dabei Zusammenhänge geprüft: So wird mit jeweils passenden Korrelation zu dem Anteil der Ein- und Zweifamilienhäusern und des Haushaltstyps die technische Funktionalität bestätigt. Mit jeweils passenden Korrelationen zu der Anzahl der Pkw je Haushalt

und der Arbeitslosenquote sind die Ergebnisse auch durch einen Vergleich mit Daten, die nicht in das Modell als Eingangsgröße eingehen, inhaltlich plausibel. Lediglich beim Abgleich mit dem Ist-Anteil von Elektrofahrzeugen kann kein – eigentlich zu erwartender – positiver Zusammenhang abgebildet werden. Dieser Umstand ist vor dem Hintergrund der bisher niedrigen Marktdurchdringung (rund 1,1% der Fahrzeuge sind Elektrofahrzeuge in den betrachteten Stadtteilen) zu sehen. Ein alternativer Datensatz, der die Affinität zu Elektrofahrzeugen abbildet, zeigt zu allen oben genannten stadtteilweiten Ist-Daten umgekehrte Vorzeichen der Korrelationskoeffizienten wie die eigenen Modelldaten. Dieser erscheint – im Gegensatz zu den hier modellierten Daten – damit für den Anwendungsfall nicht geeignet.

Ein Bedarf nach öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur entsteht wiederum durch Elektrofahrzeuge ohne Heimplade-Möglichkeit und durch POI, wie beispielsweise Geschäfte und Sportstätten, die Zielorte für Fahrten sind. Für das Beispiel Hamburg im Jahr 2040 werden dafür rund 166.000 Elektrofahrzeuge ohne Heimplademöglichkeit und insgesamt 95.311 POI in acht Kategorien berücksichtigt. Die POI werden dabei anhand von Anfahrtshäufigkeiten, zugeteilt über die Kategorien und eine abgeschätzte Größenklasse, bewertet. Diesen Bedarfen steht das Potential in Form von Parkraum gegenüber. Er wird ausgehend von unterschiedlichen Objekttypen aus OpenStreetMap vereinheitlicht als Rasterkarte modelliert. Die gewichteten Bedarfe werden in einer rasterbasierten Berechnung auf einzelne Parkplätze aufgeteilt und ermöglichen eine wiederholte Zufallsziehung und damit die Erstellung von Ladestellen-Verteilungen. So werden 50 räumliche Verteilungen mit je rund 14.000 öffentlich zugänglichen Ladestellen erstellt. Die Modellierung wird anhand eines Verfahrensvergleichs validiert, indem die räumlichen Bedarfe mit den Ergebnissen anderer Verfahren – unter anderem einem in der Literatur beschriebenen KI-Verfahren – verglichen werden. Die Validierung erfolgt dabei in zwei Schritten: Erstens werden anhand qualitativer Kriterien die jeweiligen Ergebnisse einzeln geprüft. Das entwickelte Modell zeigt dabei richtigerweise eine Unterscheidung von städtischen Gebieten und Randgebieten. Auch eine Heterogenität im Betrachtungsgebiet und – mit kleineren Einschränkungen – eine angemessene Granularität der Ergebnisse wird erreicht. Die Bewertungsergebnisse zeigen zudem eine plausible Bandbreite an Werten, was das hier vorgestellte Modell auch von dem KI-Verfahren abhebt. Zweitens werden Hypothesen zur gegenseitigen Korrelation der Verfahrensergebnisse aufgestellt und nach durchgeführter Korrelationsanalyse geprüft. Die Hypothesen zur jeweils unterschiedlichen Ähnlichkeit der Modellergebnisse werden dabei bestätigt. Auffällig ist allerdings, dass das KI-Vergleichsverfahren und das in dieser Arbeit entwickelte Modell nur wenig stärker miteinander korrelieren, als jeweils

Zusammenfassung
(halb-) öffentliches
Laden

mit einem trivialen Vergleichsmodell, trotz vergleichbarer Eingangsdaten der zwei erstgenannten Verfahren. Man kann daraus schlussfolgern, dass die Bildung der Methodik sehr zentral ist und alleine die Auswahl passender Eingangsdatensätze keine Garantie für plausible Modellergebnisse darstellt. Zudem zeigt sich ein nur geringer Unterschied der zwei Modelle mit und ohne Kopplung zu den detaillierten Orten von Elektrofahrzeugen ohne Heimlademöglichkeit. Für die quantitativen Ergebnisse ist eine solche Kopplung also nicht zentral, auch wenn sie für die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse hilfreich ist.

Zusammenfassung
Szenarienbildung
und Schnittstelle

Die zuvor genannten regionalisierten Datensätze werden in einheitlichem Format über eine PostGIS-Datenbank für weitere Schritte bereitgestellt, womit eine inhaltliche wie räumliche Sortierung, Filterung und Verknüpfung mit weiteren Datensätzen, wie beispielsweise regionalisierten Wärmepumpen, ermöglicht wird. Die Bereitstellung der punktgenauen Ladestellen einschließlich einer Zubaureihenfolge ermöglicht unterschiedliche, vom Basisfall abweichende Zusammenstellungen an Ladestellen. Zudem kann über die mitgeführten sozioökonomischen Haushaltsattribute eine stimmige Zuordnung von Daten anderer Forschungsergebnisse, beispielsweise von Fahr- und Ladezeitreihen, erfolgen. Insgesamt stehen für das Beispiel Hamburg so 11,36 Mio. Dateneinträge für Heimladestellen und 1,09 Mio. Dateneinträge für (halb-) öffentliche Ladestellen zur Verfügung, aus denen flexibel Szenarien ableitbar sind.

Fazit

Somit können mit dem hier entwickelten Modell plausible Verteilungen räumlich hochaufgelöster Ladestellen erzeugt werden, dabei werden Heimladestellen und öffentlich zugängliche Ladestellen betrachtet. Die Modellierung der Heimladestellen zeichnet sich dadurch aus, dass der demografische Wandel, die Sozioökonomik und die Zuteilung der Haushalte auf Gebäude berücksichtigt werden. Die Modellierung öffentlich zugänglicher Ladestellen bildet im holistischen Ansatz die Ladebedarfe durch fehlende Heimlademöglichkeit und durch POI ab und stellt diesen Ladebedarfen das Parkplatzpotential gegenüber. Die verschiedenen Zwischenschritte wurden plausibilisiert und validiert, insbesondere durch Korrelationsanalysen mit Vergleichsdaten, für die vorhergehend Hypothesen gebildet, anschließend geprüft und weitgehend bestätigt wurden. Die Struktur der Modellergebnisse erlaubt dabei zum einen die Anwendung in probabilistischen Netzrechnungen, für die ein Mehrwert durch die höhere Auflösung nachweislich erreicht wird, und zum anderen die Bildung einer großen Szenarienbandbreite.

Bedeutung der
Arbeit

Der schnelle, nachhaltige und effiziente Ausbau der Verteilnetze stellt eine große Herausforderung für die Energiewende dar und zeigt einen akuten Mangel in unserer bisherigen Infrastruktur für die Versorgung der Elektromobilität auf. So be-

ziffert eine Studie der Agora Energiewende die Kosten des benötigten Netzausbau aufgrund der Elektrifizierung des Verkehrs auf bis zu 108 Mrd. €, stellt aber gleichzeitig mögliche Reduktionen dieser Kosten um bis zu 50 % vor [40]. Die in der vorliegenden Arbeit gezeigte Ladestellenregionalisierung ist in der bisher nicht da gewesenen Detaillierung ein dringend benötigtes und äußerst wertvolles Werkzeug. So kann der Ausbau verständlich, planbar und damit so kosteneffizient wie möglich gestaltet werden. Innovativ ist die Schaffung neuer Methoden und die Übertragung etablierter Verfahren wie beispielsweise der Nutzwertanalyse in diesen Bereich. Ebenfalls neuartig sind die Verknüpfungen, wie die Verbindung der MiD- zu den OSM-Daten zur Bestimmung lokalisierter Anfahrtshäufigkeiten. Die in peer-reviewten, wissenschaftlichen Journalen veröffentlichten Erkenntnisse der Arbeit fließen bereits jetzt in mehrere Folgeprojekte ein und wurden bereits mehrfach, auch international, zitiert. Darüber hinaus finden sie praktische Anwendung bei zwei Verteilnetzbetreibern der Thüga-Gruppe (Stadtwerke Wiesbaden Netz GmbH, Braunschweiger Netz GmbH) und der Stromnetze Hamburg GmbH, um dazu beizutragen, eine geeignete Infrastruktur für den rasanten Lastzuwachs zu planen. Damit wurde in einem höchst relevanten Themenfeld ein sehr wertvolles Werkzeug geschaffen, das für einen Erkenntnisgewinn in Wissenschaft und Praxis sorgt und einen zentralen Beitrag für die Umsetzung der Energiewende leistet.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel wird die vorliegende Arbeit zunächst mit dem Stand der Forschung gegenübergestellt. Anschließend werden die Vor- und Nachteile des Modellaufbaus diskutiert und die forschungsleitenden Fragestellungen zusammenfassend beantwortet. Abschließend werden die Anwendungsfelder und Übertragbarkeiten dargestellt.

5.2.1 Einordnung in den Stand der Forschung

Insbesondere durch die Kombination der hohen Auflösung der erzeugten Verteilung, der holistischen Betrachtung unterschiedlicher Ladestellentypen und der effizienten Verknüpfung mit weiteren Forschungsarbeiten über die strukturierte Datenablage stellt das Modell eine originäre Ergänzung zum bisherigen Stand der Forschung dar. Es wurden Methoden entwickelt und aus anderen Anwendungsfeldern übertragen, wie beispielsweise die Nutzwertanalyse, die üblicherweise für die einzelne Entscheidungsfindung angewendet wird, und hier auf die vergleichende Standortfindung übertragen wurde. Neue, bisher nicht verfügbare

Übersicht
Diskussionskapitel

Alleinstellungs-
merkmale

Datensätze wurden geschaffen, wie beispielsweise eine bundesweite Demografieentwicklung bis 2040 auf Ebene der einzelnen Gemeinden unter Berücksichtigung der jahresgenauen Altersstruktur.

Zur Einordnung in den Stand der Forschung ist die von PAGANY ET AL. eingeführte Kategorisierung hilfreich: So ist die vorliegende Arbeit nutzer-/zielorientiert („User/destination orientation“ in Abgrenzung zur „Route orientation“) und nutzt für das Teilmodell des öffentlichen Ladens Bedarfsdichten („Demand density“) [15]. Weitere Aspekte der Einteilung von PAGANY ET AL., wie die Berücksichtigung der Verweilzeit („Dwell time“), der Reisezeit („Travel time“) und der Finanzierungskosten werden in Arbeiten von Kolleg:innen abgebildet, die mit der vorliegenden Forschungsarbeit verknüpft sind (verknüpfte Arbeiten siehe [23; 99], Kategorisierung siehe [15]).

Zur Einordnung des Modells in den Stand der Technik erfolgt zudem der Vergleich mit verschiedenen thematisch verwandten Arbeiten:

Das vorliegende Modell hebt sich schon in der gemeindeweiten Regionalisierung von bestehenden Arbeiten wie beispielsweise [7; 8; 42] durch die detaillierte Modellierung des demografischen Wandels ab.

Die Nutzung von dem darauf aufbauenden abgeleiteten Bevölkerungsmodell, insbesondere aber die Verknüpfung mit POI-Daten in der Detailregionalisierung, hebt es zudem von geometriefokussierten Untersuchungen wie [45] ab. Das Modell erfüllt damit richtigerweise auch die Berücksichtigung von Nachbarschaftsverhältnissen, was nach PAGANY ET AL. in [50] sinnvoll ist.

Letztgenannte Quelle hat Gemeinsamkeiten mit der vorliegenden Arbeit in der Berücksichtigung von POI, der Bevölkerung und der Bewertung des Umkreises unter Annahme von möglichen Laufwegen. Die hier vorliegende Arbeit hebt sich dabei zum einen durch die Berücksichtigung verschiedener Ladestellentypen ab. Zum anderen hört die Modellierung der öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur in [50] bei dem Schritt der Bedarfsbenennung auf, während das vorliegende Modell eine Berücksichtigung der Parkplatzpotentiale und eine Generierung von Ladestellenverteilungen enthält.

Im Vergleich mit verschiedenen detaillierten Arbeiten zu Beispielregionen [53; 57] zeichnet sich die hier vorliegende Arbeit durch die breite Einsetzbarkeit in allen deutschen Gemeinden aus.

Die vorliegende Arbeit hebt sich von einer anderen Arbeit mit vergleichbaren Eingangsdaten, aber grundsätzlich anderem Verarbeitungsansatz [21] (KI-Ansatz

anstatt Modellierung in Teilschritten) durch die Nachvollziehbarkeit der Zwischenschritte ab, insbesondere aber durch die Abbildung plausibler Bewertungen auch in abgelegenen Gebieten.

Zusammenfassend liegt die Stärke des vorliegenden Modells sowohl in der Zusammenführung verschiedenster Aspekte (gemeindeweite Regionalisierung, Heimpladen, öffentliches und halböffentliches Laden, sozioökonomische Betrachtung, demografischer Wandel, Anbindung an Netzberechnungen, ...) als auch in der Detaillierung dieser Einzelaspekte.

5.2.2 Aspekte des Modellaufbaus

Der Modellaufbau ist gekennzeichnet durch eine Aufteilung in Teilmodelle und -schritte. So werden übergreifend Ausbauzahlen auf Gemeindeebene bestimmt, um in Teilmodellen die jeweiligen Ladestellentypen innerhalb einer Gemeinde zu regionalisieren (vergleiche Modellstruktur in Abbildung 12). Auch innerhalb einer solchen Feinregionalisierung erfolgen Aufteilungen von „Groß“ nach „Klein“, was einige Vorzüge mit sich bringt:

- Datenfehler in kleinräumigen/feineren Modellschritten verbleiben in diesem Schritt und haben keinen Einfluss auf andere Modellteile.
- Einzelne Teilmodelle lassen sich modular prüfen und weiterentwickeln.
 - Damit sind auch Modellvereinfachungen validierbar, wie beispielsweise die Durchführung des Teilmodells für (halb-) öffentliches Laden auch ohne Modellkopplung zum Heimpladen (siehe 3.5.5).
 - Quantitative Annahmen lassen sich gut prüfen, wie beispielsweise der Faktor 0,3 für den Anteil der Straßenlänge, der für Parkplätze zur Verfügung steht. Er ist valide, da das Potential auch für hohe Ladebedarfe nicht ausgeschöpft wird (siehe Kapitel 3.5.3 und 4.5).

Ein Nachteil dieses Modellaufbaus ist, dass ein möglicherweise über- oder unterschätzter Gesamtausbau von Elektrofahrzeugen oder Ladeinfrastruktur sich auch immer auf die regionalen Zahlen auswirkt. Die Aufteilung von ‚Groß‘ nach ‚Klein‘ verhindert damit eine Übertragung lokaler Fehler, lässt aber andersherum die Aufprägung von Fehlern von höherer Modellebene zu. Hier ist zu beachten, was die vorliegende Arbeit adressiert: Es wird ein vorher festgelegter Gesamtausbau detailliert regionalisiert und keine Vorhersage über die absolute Anzahl von Ladestellen in einem Gebiet getroffen.

Hierarchie des
Modellaufbaus

5.2.3 Abgleich mit den forschungsleitenden Fragestellungen

Die vorliegende Arbeit als Ganzes stellt die Antworten auf die forschungsleitenden Fragestellungen aus Kapitel 1.2 dar. Es lassen sich folgende zusammenfassende Antworten formulieren:

Zusammenfassende
Beantwortung der
forschungsleitenden
Fragestellungen

Die zweistufige Regionalisierung unter Berücksichtigung von sozioökonomischen Daten und Points of Interest bietet für die räumliche Abbildung (Regionalisierung) zukünftiger Elektrofahrzeug-Ladestellen Vorteile in der Nachvollziehbarkeit, in der Fehlerüberprüfung, für die Variantenbildung und für die Weiterentwicklung einzelner Teilmodelle.

Ein ausreichender Detaillierungsgrad für eine punktgenaue Verortung kann für die Modellierung von Heimladestellen mit einer gebäudegenauen Modellierung und für die öffentlich zugänglichen Ladestellen mit einer parkplatzgenauen Modellierung erreicht werden, womit ein nachweislicher Mehrwert für die Netzberechnung entsteht.

Die interdependente Regionalisierung unterschiedlicher Ladestellentypen eignet sich für die Modellierung einer großen Bandbreite von Szenarien. Insbesondere durch die Struktur der modellierten punktgenauen Daten einschließlich einer Zubaureihenfolge und der Verknüpfbarkeit mit weiteren Datensätzen wird sowohl eine effiziente Rechen- bzw. Anwendungszeit, als auch eine Integrierbarkeit in andere Forschungsarbeiten der Szenarienerstellung ermöglicht. Während eine Berücksichtigung unterschiedlicher Ladestellentypen zentral für die Anwendung in Netzberechnungen ist, zeigt sich, dass eine integrative Modellkopplung für die quantitativen Ergebnisse nicht zentral sein muss und einzelne Ladestellentypen grundsätzlich auch unabhängig voneinander modelliert werden können, wenngleich die Modellkopplung Vorteile für die Nachvollziehbarkeit und Darstellung haben kann.

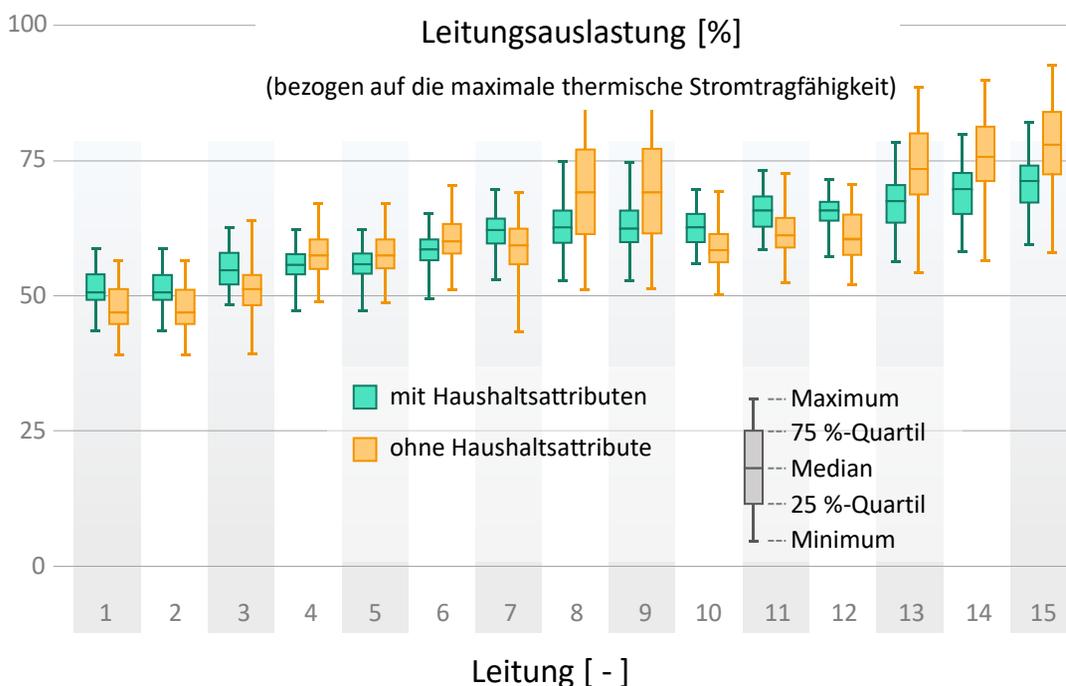
Zusammenfassende Antworten auf die forschungsleitenden Fragestellungen

Die eingangs formulierten Forschungsfragen konnten somit umfassend und präzise beantwortet und die Aussagekraft der breit anwendbaren Methodik anhand der Validierung bewiesen werden.

5.2.4 Anwendungsbereiche und Übertragbarkeiten

Anwendung findet das hier entwickelte Modell insbesondere im Bereich der szenarienbasierten Netzberechnungen, bei denen mögliche zukünftige Netzbelastungen simuliert werden, wie es beispielsweise im Projekt „Ladeinfrastruktur 2.0“ umgesetzt wird. Die dort durchgeführten Simulationen zeichnen sich durch eine probabilistische Netzberechnung aus. In gemeinsamen Arbeiten mit Kolleg:innen konnte gezeigt werden, dass nur mit einer punktgenauen Verortung eine korrekte Zuordnung zu den Verteilnetzen erreicht werden kann. Im Gegensatz dazu führt eine pauschale Zuordnung anhand von gruppierten (in dem Fall straßenzugweiten) Zuordnungsdaten zu abweichenden Netzanschlusspunkten, die von anderen, benachbarten Ortsnetzen / Ortsnetztrafos versorgt werden [13]. Auch die Berücksichtigung der Haushaltsattribute zeigt in zweierlei Hinsicht einen Vorteil in der Simulation der Netzauslastung: Erstens zeigen sich in den probabilistischen Netzberechnungen andere Mediane für die Strangauslastungen, diese sind aufgrund der Berücksichtigung der sozioökonomischen Daten als die realistischeren anzusehen (siehe Validierung der Haushaltsbewertung in Kapiteln 3.4.3 und 4.4). Zweitens sind die Streuungen in den einzelnen Leitungsauslastungen in verschiedenen Ladepunktverteilungen kleiner, die Unsicherheit der probabilistischen Netzberechnung wird daher ebenfalls geringer (siehe Abbildung 28 und weiterführend [13]).

Primärer
Anwendungsbereich
Netzberechnungen



(sortiert nach kleinster Leitungsauslastung von den von ULFFERS betrachteten Leitungen in [13])

Abbildung 28: Anwendung Netzberechnung: Leitungsauslastung, nach [13]

Die Regionalisierung stellt somit sowohl in der Auflösung als auch in der inhaltlichen Begründung der möglichen Ladestellenstandorte einen essentiellen Fortschritt dar. Die vorliegende Arbeit ist damit ein wichtiges Element, um einen gut begründeten netzverstärkenden Ausbau zu planen. Die Größenordnung der Netzausbaukosten (siehe Kapitel 5.1) untermauert auch die wirtschaftliche Bedeutung der Arbeit.

Diskussionsanstoß
und
Plausibilisierung

Weiter hilft die konkrete räumliche Verteilung auch der Plausibilisierung der gemachten Annahmen. Die vorliegende Arbeit unterstützt damit nicht nur die Beantwortung der Frage ‚*Was bewirkt ein solcher Hochlauf der Elektromobilität?*‘, sondern auch der Frage ‚*Ist ein solcher Hochlauf plausibel?*‘. Dies befähigt insbesondere Verteilnetzbetreiber dazu, einen möglichen zukünftigen Ladestellenausbau einzuordnen, Annahmen zu überarbeiten und Netzüberlastungen zu vermeiden. So wurden beispielsweise die ersten Regionalisierungsergebnisse für Hamburg gemeinsam mit den Experten der Stromnetze Hamburg GmbH diskutiert, woraufhin festgestellt wurde, dass eine Regionalisierung ohne Berücksichtigung der Zulassungszahlen zu unrealistisch hohen Zubauzahlen in Metropolen führt. Die Zulassungszahlen sind daraufhin in das Modell integriert worden, siehe Formel (1) in Kapitel 3.2.2.

Übertragbarkeiten

Das hier vorgestellte Modell ist für alle Gemeinden in Deutschland anwendbar. Die dafür benötigten Daten, insbesondere die Adressdaten, sozioökonomische Daten, Fahrzeugmeldezahlen und Ist-Bevölkerungszahlen liegen deutschlandweit vor. So wurde die Modellierung im Projekt „Ladeinfrastruktur 2.0“ für insgesamt 27 Gemeinden durchgeführt. Auch die Übertragung auf unterschiedliche Szenarienjahre (hier meist dargestellt für das Jahr 2040) ist durch die jährlich betrachtete Bevölkerungsentwicklung und den konsekutiven Zubau möglich. Eine Übertragung auf Gebiete außerhalb Deutschlands hat Grenzen durch die Datenlage: Für andere Länder sind sowohl die Bevölkerungsdaten der GfK in dieser Form, als auch verschiedene hier genutzte statistische Daten wie die Pkw-Meldezahlen oder die Bevölkerungsprognose der Bertelsmann-Stiftung nicht verfügbar. Durch Datenaufbereitung und Anpassungen ist das Modell aber grundsätzlich auch für Anwendungsgebiete außerhalb Deutschlands einsetzbar. Dem Autor sind keine Gründe bekannt, die gegen eine generelle Übertragbarkeit der Methodik auf andere Länder sprechen. Aufgrund anderer gesellschaftlicher Faktoren wie beispielsweise einem geringeren Anteil an Mietwohnungen müssten dafür die im Modell genutzten Merkmale für Elektrofahrzeuge (siehe Kapitel 3.4.1) geprüft werden. Dabei müsste zumindest eine Anpassung der Bewertungen in der Nutzwert-Analyse entsprechend der nationalen Statistiken erfolgen (siehe Kapitel 3.4.2), ggf. müsste auch die Auswahl der Merkmale an sich (siehe Ende

Kapitel 3.4.1) angepasst werden. Eine abstraktere Übertragung von Verfahren, die hier genutzt werden (wie die Nutzwertanalyse, die Rasterberechnungen und weitere), auf die Modellierung anderer Technologien wie Wärmepumpen oder Photovoltaikanlagen erscheint möglich, da auch hier sozioökonomische Faktoren auf ähnliche Weise wirken könnten. Diese würde aber eine weiterreichende Anpassung des Modellaufbaus erfordern. Bei den Übertragbarkeiten zeigt sich zudem ein Vorteil gegenüber KI-Ansätzen (vgl. Kapitel 3.5.5 und 4.5): So lässt sich aufgrund des Modells in Einzelschritten prüfen und übertragen, welche Methoden für andere Technologien plausibel erscheinen und welche Daten hierfür angepasst werden müssen.

Wie für jedes Modell ist die Validierung, also die Bewertung der Gültigkeit des Modells, gebunden an die Anwendung (siehe Definition der Validierung in Kapitel 1.5.2). Für andere Anwendungen müsste die Validität zunächst geprüft und gegebenenfalls durch Modellanpassungen geschaffen werden. Eine pauschale Aussage, ob eine zukünftige Ladestellenverteilung ‚richtig‘ ist, lässt sich ohne Berücksichtigung der geplanten Anwendung nicht treffen. Mit dem folgenden Beispiel wird die Abhängigkeit der Validität vom Anwendungsfall verdeutlicht: Der Modellierung der öffentlichen und halböffentlichen Ladestellen liegt die Annahme zugrunde, dass die Ladestellen rein bedarfsgetrieben zugebaut werden. Neben diesem Bedarf spielen in der Realität auch weitere Faktoren eine Rolle. So können beispielsweise auch Imagegründe, gesetzliche Vorgaben oder schlichtweg Fehlplanungen den Ausbau beeinflussen. Hier ist jedoch die Netzplanung als adressierte Anwendung zu betrachten. Eine Ladestelle, die nicht mit einem Ladebedarf verbunden ist, hätte auch keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Netzauslastung. Folgerichtig ist diese Vorgehensweise für diese Anwendung valide.

Limitation der Validierung entsprechend des Anwendungsfalls

5.3 Ausblick

Die vorliegende Forschungsarbeit kann durch verschiedene Modellerweiterungen fortgeführt werden, wodurch sich der Detaillierungsgrad des Modells erhöhen lässt und weitere Anwendungsfelder erschlossen werden können. Für jede Modellerweiterung ist dabei der mögliche Mehrwert gegen die erhöhte Komplexität abzuwägen. Diese Weiterführung der Forschung wird in die folgenden drei Gruppen aufgeteilt:

Übersicht Kapitel Ausblick

- umgesetzte Forschungsarbeiten und Anwendungen (vom Autor oder Kolleg:innen), die nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit liegen
- mögliche Modellerweiterungen in der bestehenden Modellstruktur

- interdisziplinäre Modellstruktur-Ausweitung

5.3.1 Umgesetzte Arbeiten

Ladestellen beim Arbeitgeber

Neben den in dieser Arbeit dokumentierten Teilmodellen für private Ladestellen und (halb-) öffentliche Ladestellen wurde zudem ein Teilmodell für Ladestellen beim Arbeitgeber erstellt. Für die Regionalisierung auf Gemeindeebene werden dafür die sozialversicherungspflichtig Beschäftigten und die Einpendler als Eingangsgrößen genutzt (anstatt der Einwohner und der Auspendler wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben). Die Detailregionalisierung erfolgt auf einer – im Vergleich zu den hier vorgestellten Methoden für die anderen Ladestellentypen – relativ einfachen Aufteilung anhand der Größe von Gewerbegebieten und Parkplätzen. Die Methodik erlaubt die umfassendere Betrachtung unterschiedlicher Ladestellentypen in Projekten wie „Ladeinfrastruktur 2.0“ und stellt damit einen erheblichen Mehrwert für die Praxis dar, ist aber aufgrund der einfachen Methodik nicht Teil der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit.

Energieerzeuger und Ladeprofile

Folgende Forschungsarbeiten wurden umgesetzt und sind mit der vorliegenden Arbeit verknüpft (vgl. Abbildung 12):

- bestehende Eingangsmodelle/Daten, wie die Zuordnung von Straßenabschnitten zu Einzeladressen von HORST und die Forschung zu Fahrzeughochläufen von TROST in [38; 39] und von FRISCHMUTH in [13], siehe auch Kapitel 3.2.1.
- regionalisierte Energieerzeuger und Ladeprofile von BONIN, vergleiche dazu Kapitel 4.6 und [23]
- die Anwendungen in der Netzberechnung von ULFFERS in [13] und von SCHOEN ET AL. in [119]

5.3.2 Mögliche Erweiterungen in der Modellstruktur

Vielversprechende Ansätze zur weiteren Modellentwicklung im Rahmen der bestehenden Modellstruktur sind im Folgenden genannt.

Haushaltsbildung bei Bevölkerungszuwachs

Überarbeitung Haushaltsbildung

Die Bildung von Haushalten, die durch den demografischen Wandel durch Bevölkerungswachstum entstehen, könnte überarbeitet werden. Aktuell können unrealistisch große Haushalte entstehen, was durch die Einführung oberer Schranken für die Personenanzahl der Haushalte verhindert werden könnte. Insgesamt könnte die Zusammenstellung von Einzelpersonen in den jeweiligen Haushalten überarbeitet werden, so dass realistischere Haushalte abgebildet werden. Weitere Datenquellen müssten dafür nicht genutzt werden, trotzdem wäre durch den

Eingriff in das verhältnismäßig komplexe Personen- und Haushaltsmodell diese Erweiterung eher umfangreich. Sie könnte die kleinräumige Verteilung von Einwohnern verbessern und damit weitere Anwendungen ermöglichen.

Anpassung der Ladestellenanzahlen auf Ebene der Gemeinden

Eine Untersuchung des Modal Split (also der Anteile verschiedener Verkehrsmittel an der zurückgelegten Wegstrecke) zeigt einen geringeren Pkw-Anteil für Metropolen [89]. Im Modell bereits erfasst sind niedrigere Fahrzeugzahlen je Einwohner durch niedrigere Pkw-Meldezahlen (vergleiche Tabelle 12 in Kapitel 4.2). Eine ebenfalls geringere Fahrstrecke pro Fahrzeug könnte jedoch trotzdem zu einer Überschätzung des Ladestellenbedarfs ins Metropolen führen. In der aktuellen Modellierung wird damit tendenziell der Bedarf an Ladestellen in Metropolen überschätzt, was für das Anwendungsgebiet Hamburg zumindest dem Prinzip der konservativen Abschätzung entspricht, denn es wird im Zweifel der kritischere Fall abgebildet. Als Basis für eine Überprüfung und Anpassung eignen sich die aktuell in Arbeit befindlichen Untersuchungen von BONIN, der Mobilitätsgruppen nach Regionstyp unterscheidet und Ladezeitreihen modelliert [23]. Da eine mögliche Weiterentwicklung dieser Rahmencahlen auf der Gemeindeebene stattfindet und keine Anpassung der detaillierteren Detailregionalisierung erfordert, ist der mögliche Entwicklungsaufwand als überschaubar abzuschätzen.

Überarbeitung
Ladestellenanzahl:
Berücksichtigung
Modal Split

Bewertung von Parkflächen

Im hier vorgestellten Modell ist jedes Parkplatzpotential gleichwertig, bewertet wird ausschließlich der Bedarf. In der Realität ist die Erschließbarkeit für Ladestellen von Parkflächen zusätzlich ein wichtiger Faktor. Diese Erschließbarkeit könnte im Modell differenziert werden. Eine solche Differenzierung der Parktypen (in Parkhäuser, Parkflächen, und Parkplätze am Straßenrand, einschließlich der Berücksichtigung der Ausrichtung zum Straßenrand) ist im Einlesevorgang aus den OpenStreetMap-Daten schon im aktuellen Modell gegeben. Die Modellerweiterung würde damit ausschließlich eine Weiterentwicklung der Rasterrechnung (vergleiche Kapitel 3.5.4) erfordern. Sie wäre insbesondere geeignet für eine vertiefte Untersuchung von räumlichen Schwerpunkten öffentlich zugänglicher Ladestellen. Es sei angemerkt, dass eine solche Bewertungsänderung der Parkflächen keinen Einfluss auf die Validierung in Kapitel 3.5.5 hätte, da dort die – vom Parkplatzpotential unabhängige, auf den gesamten Raum verteilte – Bewertung verglichen wird. Diese mögliche Modellerweiterung ist also im Modellaufbau schon mitberücksichtigt und würde einen überschaubaren Aufwand darstellen.

Überarbeitung der
Bewertung von
Parkflächen

Modellierung von
parkplatzinternen
Wegen

Parkplatzinterne Wege

Im hier vorgestellten Modell werden Parkflächen vollumfänglich als Parkpotential angenommen, die gesamte Parkfläche quasi in Parkplätze aufgeteilt (vgl. Kapitel 3.5.3). Es wäre möglich, die parkplatzinternen Wege dezidiert zu modellieren, was kleinere (und realistischere) Parkplatzpotentiale zur Folge hätte. Eine solche Modellerweiterung würde einen Mehrwert für den Sonderfall von sehr hohen Ladestellendichten auf großen Parkflächen bedeuten. Für die aktuelle Anwendung ist der Einfluss als gering einzuschätzen. Bei größeren Parkplätzen steht genug Parkraum für Ladestellen selbst im Bereich hoher Ladebedarfe zur Verfügung (vgl. Abbildung 23). Da die aufgeteilten Bedarfe flächenbezogen sind, wird auch der über den Parkplatz summierte Bedarf und damit die Anzahl der Parkplätze korrekt abgebildet. Einen Einfluss hat die bisher vereinfachte Flächenbetrachtung damit insbesondere bei einer Näherung an die Potentialgrenze und für Darstellungsfragen. Dem steht ein vergleichsweise hoher Aufwand gegenüber.

Berücksichtigung
der Entfernung zu
POI

Entfernung zu POI

Die Entfernung, die für den Ladestellenbedarf durch POI als relevant angenommen wird, wird im aktuellen Modell pauschal mit 300 Metern angenommen, was einer üblichen Entfernung zwischen zwei Bushaltestellen entspricht (vgl. Kapitel 3.5.4). Der Bedarf wird innerhalb dieses Radius gleichmäßig auf Parkflächen verteilt. Das Modell könnte an dieser Stelle in mehreren Schritten geprüft und ergänzt werden. Erstens ist diskutabel, ob die Entfernung zwischen zwei Bushaltestellen oder die Entfernung der Mitte bis zur nächsten Bushaltestelle einen üblicherweise akzeptierten Laufweg darstellt. Zweitens könnte der Bedarf in einer Funktion in Abhängigkeit der Entfernung zugeteilt werden, was auch eine höhere Differenzierung in Stadtteilen zur Folge hätte (vgl. Kapitel 3.5.5 und Abbildung 26). Drittens könnte der konkrete Laufweg anhand von Straßen und Wegen berücksichtigt werden, anstatt der Entfernung als Luftlinie. Dies hätte eine erhebliche Erweiterung der Datensätze und Methoden zur Folge, da die hier vorgestellten Rasterrechnung mit der Moving-Kernel-Betrachtung nicht ohne weiteres nutzbar wäre.

Bewertung der POI
anhand Anfahrts-
häufigkeiten

Bewertung der POI

Im hier vorgestellten Modell wird die Bewertung der POI, die einen Ladebedarf verursachen, über eine Kategorie und Größenklasse zugeteilt (vergleiche Tabelle 18 bis Tabelle 20 in Kapitel 4.5). Eine mögliche Modellerweiterung bestünde darin, die POI nicht mehr anhand der Anfahrtsfrequenz der POI-Kategorie zu bewerten, sondern nach der individuellen Anfahrtsfrequenz (vergleiche den Ansatz auch mit dem Ausblick aus [22]). Als mögliche Datenquellen sind wiederum

die Daten der MiD-Studie [89] zu nennen. Neben den kategorisierten Anfahrts-häufigkeiten enthält diese auch individuelle Wege mit Start- und Zielpunkten in einem Rasterformat. Auch Bewegungsdaten, wie sie beispielsweise von Google erhoben und ausgegeben werden [126], könnten berücksichtigt werden. Insbesondere bei ersterem Datensatz wäre zu prüfen, ob damit eine repräsentative Anfahrts-häufigkeit abgebildet werden kann. Grundsätzlich würde bei einer solchen Modelländerung eine erhöhte lokale Genauigkeit auf Kosten einer verminderten Stabilität quasi eingekauft werden, da individuelle Bewertungen (passende, wie auch fehlerhafte) berücksichtigt würden. Zudem würde die Abhängigkeit von lokalen Daten erhöht werden. Diese potentielle Modellerweiterung ist als umfangreich einzuschätzen, bezogen sowohl auf den Einfluss auf die Ergebnisse dieses Modellschritts, als auch auf den Arbeitsumfang.

5.3.3 Interdisziplinäre Modellstruktur-Ausweitung

Das vorliegende Modell ist an zwei Stellen mit Fahrprofilen verknüpft. Zum einen stellen die Anfahrts-häufigkeiten eine Modelleingangsgroße dar, zum anderen können Ladepprofile, die wiederum von Fahrprofilen abgeleitet sind mit den Ladestellen verknüpft werden. An beiden Stellen sind die Fahrprofile nicht Teil des Modells selbst. Es wäre möglich, Methoden der Stadtplanung und Verkehrsführung integrativ im Modell zu berücksichtigen (vergleiche den Ansatz auch mit dem Ausblick aus [22]). Eine solche, noch stärker interdisziplinäre Forschungsarbeit bietet die Möglichkeit breiterer Anwendungsfälle. Von Untersuchungen des Model-Split über lokale Verkehrsmittelwechsel (Park&Ride) bis hin zur Stadt- bzw. Quartiersplanung. Dem gegenüber stehen eine erhöhte Komplexität und längere Berechnungszeiten. Für eine solche umfangreiche und interdisziplinäre Modellerweiterung steht mit der Datenstruktur der vorliegenden Arbeit eine sehr potente Schnittstelle zur Verfügung.

Verbindung mit
Verkehrsplanung

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit des Modells liegt in der Simulation von sektorgekoppelten Energiesystemen, beispielsweise unter Einbeziehung von lokalen Strom- und Wärmenetzen in Quartierslösungen. Mit dem Fortschreiten der Energiewende und damit einem Wandel zu dezentraleren Energiesystemen steigt der Bedarf nach solchen integrativen Untersuchungen, die Synergien zwischen Energieinfrastrukturen (elektrische Erzeugung/Speicher, Mobilität, Wärme) abbilden und untersuchen. Gleichzeitig verbessert sich durch die fortschreitende Digitalisierung im Allgemeinen und dem Trend zu OpenData im Speziellen auch die Datenlage für solche Untersuchungen. Das vorliegende Modell hat hier das Potential, partizipativ in weitere Untersuchungen eingekoppelt zu werden, insbesondere durch die Anbindung an GIS-Systeme und die Verknüpfung unterschiedlicher Datensätze, von der Sozioökonomik, über die Gebäudedatensätze bis

Weitere Beispiele
für Anwendungs-
ausweitung

hin zu der Schnittstelle an die Netzberechnungen. Zudem bietet die Anbindung an GIS-Systeme einen Grundstein für grafische – potentiell interaktive – Veranschaulichungen und damit beispielsweise auch für den Einsatz in der Politikberatung und ganz allgemein für die Nutzung im akademischen oder auch schulischen Bildungsbereich. Das entwickelte Modell ist also nicht nur für die Netzberechnung ein äußerst wertvolles Werkzeug, sondern kann auch darüber hinaus in weiteren Anwendungen für die Transformation der Energieversorgung einen fundamentalen Beitrag leisten.

Literatur

- [1] Pörtner, H.-O.; Roberts, D. C.; Poloczanska, E. S.; Mintenbeck, K.; Tignor, M.; Alegría, A.; Craig, M.; Langsdorf, S.; Löschke, S.; Möller, V. und Okem, A.: Summary for Policymakers. key findings of the Working Group II (WGII) contribution to the Sixth Assessment Report (AR6) of the IPCC: Cambridge University Press (2022). ISBN: 978-92-9169-159-3.
- [2] Umweltbundesamt: Die Treibhausgase (22.03.2022). <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase#undefined>, 22.03.2022.
- [3] Nationale Plattform Elektromobilität: Hintergrund. Erfahren Sie mehr über Motivation und Ziele. <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/hintergrund/die-ziele/>, 06.09.2018.
- [4] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland. Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015. Berlin (11/2015). http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_AG3_Statusbericht_LIS_2015_barr_bf.pdf, 06.09.2018.
- [5] Sonnenholzner, J.: Der Wallboxkampf. E-Mobilität (04.11.2020). <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/wallbox-foerderung-fehler-scheuer-101.html>, 09.03.2023.
- [6] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: Meinungsbild E-Mobilität. Meinungsbild der Bevölkerung zur Elektromobilität. Berlin (2019). https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20190527_Fakten-und-Argumente-Meinungsbild-E-Mobilitaet.pdf, 10.02.2020.
- [7] Braun, M.; Krybus, I.; Becker, H.; Bolgaryn, R.; Dasenbrock, J.; Gauglitz, P.; Horst, D.; Pape, C.; Scheidler, A. und Ulfers, J.: Verteilnetzstudie Hessen 2024 -2034. Studie im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landentwicklung. Frankfurt/Main, Kassel (16.4.2018). https://www.energieland.hessen.de/mm/Verteilnetzstudie_Hessen_2024_bis_2034.pdf, 11.03.2023.
- [8] Vopava, J.; Thormann, B. und Kienberger: Development of a Model for Power grids Based on the Cellular Approach for an Optimum Integration of Electric Charging Infrastructure. In: Energynautics GmbH (Hg.): 1st E-Mobility Power-System Integration Symposium. Tagung in Berlin (2017).
- [9] Ge, S.; Feng, L.; Liu, H. und Wang, I.: The Planning of Electrical Vehicle Charging Stations in the Urban Area. 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (2012).

- [10] *Sadeghi-Barzani, P.; Rajabi-Ghahnavieh, A. und Kazemi-Karegar, H.:* Optimal fast charging station placing and sizing. *Applied Energy* (2014), S. 289–299.
- [11] *Pape, C.:* Ansätze unterschiedlicher Akteure im Bereich der (Verteil-)Netzstudien zur Regionalisierung von Ladestellen anhand von Marktstrukturdaten. mündliches Gespräch. Kassel (2018).
- [12] *GfK geoMarketing GmbH:* Produktkatalog 2018. Digitale Landkarten | Europaweite Marktdaten | Software RegioGraph | Schulung | Beratung. Bruchsal (2018). <http://www.gfk-geomarketing.de/fileadmin/gfkgeomarketing/de/produktkatalog.pdf>, 25.02.2019.
- [13] *Gauglitz, P.; Ulfers, J.; Thomsen, G.; Frischmuth, F.; Geiger, D. und Scheidler, A.:* Modeling Spatial Charging Demands Related to Electric Vehicles for Power Grid Planning Applications. *ISPRS International Journal of Geo-Information* (2020). DOI: 10.3390/ijgi9120699.
- [14] *Gauglitz, P.; Geiger, D.; Ulfers, J. und Zauner, E.:* Modeling public charging infrastructure considering points of interest and parking potentials. *Advances in Geosciences* (2021), 1-12. DOI: 10.5194/adgeo-56-1-2021.
- [15] *Pagany, R.; Ramirez Camargo, L. und Dorner, W.:* A review of spatial localization methodologies for the electric vehicle charging infrastructure. *International Journal of Sustainable Transportation* 13 (2019), S. 433–449. DOI: 10.1080/15568318.2018.1481243.
- [16] *Schmid, T.; Jetter, F. und Gallet, M.:* Konzept und Daten zur Regionalisierung von erneuerbaren Energien. Grundlage für die Abbildung regionalisierter Szenarien im Netzentwicklungsplan Strom 2030 (Januar 2016), 25.03.2019.
- [17] *Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik:* Gesamtvorhabenbeschreibung Ladeinfrastruktur 2.0. Optimierung des koordinierten Ausbaus und Betriebs der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge und der Verteilungsnetze. Kennzeichen: 100343584. (2018).
- [18] *Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik:* Ladeinfrastruktur 2.0. Optimierung des koordinierten Ausbaus und Betriebs der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge und der Verteilungsnetze. Weitere Informationen - Infografik Ladeinfrastruktur 2.0 (09.03.2023). <https://www.iee.fraunhofer.de/de/projekte/suche/laufende/ladeinfrastruktur2-0.html#612024129>, 09.03.2023.
- [19] *Gauglitz, P.:* LI2.0 3. Konsortialtreffen. Vortrag als Beitrag im Konsortialtreffen: Arbeitspaket 3: Szenarien. Kassel / online (04.09.2020).
- [20] *Walker, G.:* Impact and Chances of Electric Mobility for the German Low Voltage Distribution Grids Folgen und Chancen der Elektromobilität für die

- deutschen Niederspannungsverteilnetze. Universität Stuttgart. Stuttgart (2018).
- [21] *Wagner, S.; Brandt, T. und Neumann, D.*: Smart city planning - Developing an urban charging infrastructure for electric vehicles. In: Avital, M., Leimeister, J. M., Schultze, U. (Hg.): Proceedings of 22th European Conference on Information Systems (ECIS), Tel Aviv: AISeL (9.-11.6.2014). ISBN: 9780991556700.
- [22] *Gauglitz, P.; Geiger, D.; Ulffers, J. und Zauner, E.*: Modeling public charging infrastructure considering spatial distribution of e-car ownership and points of interests. EGU General Assembly 2021, Session ERE2.2, EGU21-4935. Wien / online (2021). DOI: 10.5194/egusphere-egu21-4935.
- [23] *Gauglitz, P.; Ulffers, J.; Thomsen, G.; Frischmuth, F.; Geiger, D.; Bonin, M. v.; Horst, D. und Scheidler, A.*: Modeling spatial and temporal charging demands for electric vehicles for scenarios with an increasing share of renewable energies. EGU General Assembly 2020, Session ERE2.2, EGU2020-7231. (2020).
- [24] *Gauglitz, P.*: Workshop Ladeinfrastruktur 2.0 - Workshop Themeninsel 1 - Szenarien und räumliche Verteilung von Ladestellen. Netze BW / Stuttgart (14.08.2019).
- [25] *Bertram, C.*: Verifizierung und Validierung: Unterschied & Definitionen (06.09.2021). <https://www.johner-institut.de/blog/iec-62304-medizinische-software/verifizierung-und-validierung-von-medizinprodukten/>, 09.12.2021.
- [26] *Chicco, D.*: Ten quick tips for machine learning in computational biology. *BioData mining* 10 (2017), S. 35. DOI: 10.1186/s13040-017-0155-3.
- [27] Die IVA nach Richard - Integrative Validation (09.12.2021). <https://web.archive.org/web/20171029173812/http://www.integrative-validation.de/start.html>, 09.12.2021.
- [28] *Gerberich, T.*: Modellverifikation und -validierung. In: Gerberich, T. (Hg.): Lean oder MES in der Automobilzulieferindustrie. Ein Vorgehensmodell zur fallspezifischen Auswahl. Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2011 u.d.T.: Gerberich, Thorsten: LEAN und MES?: Widerspruch oder Synergie?; ein Vorgehensmodell zur fallspezifischen Auswahl der Bestandteile von Lean und MES. Wiesbaden: Gabler (2011), S. 359–390. ISBN: 978-3-8349-2929-7. DOI: 10.1007/978-3-8349-6754-1.
- [29] *ISO: DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe.* Berlin: Beuth Verlag GmbH (2015).
- [30] *enzyklo*: Plausibilisierung - Bedeutung - Enzyklo. <https://www.enzyklo.de/Begriff/Plausibilisierung>, 14.12.2021.

- [31] 50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; Tennet TSO GmbH und TransnetBW GmbH: Netzentwicklungsplan Strom 2030, Version 2017. Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber (02.05.2017). https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP_2030_2_Entwurf_Teil1.pdf, 25.03.2019.
- [32] Riedl, U.; Stemmer, B.; Philipper, S.; Peters, W.; Schicketanz, S.; Thylmann, M.; Pape, C.; Gauglitz, P.; Müller, J.; Westarp, C. und Moczek, N.: Szenarien für den Ausbau der erneuerbaren Energien aus Naturschutzsicht. FKZ: 3515 82 2900. Bonn, Bad Godesberg (2020). <https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/service/Dokumente/skripten/skript570.pdf>, 09.03.2023.
- [33] Pape, C.: Zukunftsfähige Stromnetze gestalten. STERN – Szenarien-Tool für die Erstellung von Residuallastzeitreihen für Netzausbaubedarfsanalysen. Presseinformation (2016). <https://www.iee.fraunhofer.de/de/presse-informationsdienst/Presse-Medien/Pressemitteilungen/2016/zukunftsfae-hige-stromnetze-gestalten.html>, 09.03.2023.
- [34] Böttger, D.; Dreher, A.; Ganal, I.; Gauglitz, P.; Geiger, D.; Gerlach, A.-K.; Gerhardt, N.; Harms, Y.; Härtel, P.; Knorr, K.; Jentsch, M.; Mende, D.; Pfennig, M.; Schmitz, R.; Stappel, M. und Bonin, M. v.: SYSTEMKONTEXT: Modellbildung für nationale Energieversorgungsstrukturen im europäischen Kontext unter besonderer Berücksichtigung der Zulässigkeit von Vereinfachungen und Aggregationen (2019). DOI: 10.24406/PUBLICA-FHG-300439.
- [35] Elsland, R.; Boßmann, T.; Klingler, A.-L.; Herbst, A.; Klobasa, M. und Wietschel, M.: Netzentwicklungsplan Strom - Begleitgutachten. Entwicklung der regionalen Stromnachfrage und Lastprofile. Karlsruhe (17.11.2016). https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2017/Fraunhofer_ISI_2017_Netzentwicklungsplan_Strom.pdf, 25.03.2019.
- [36] Molly, J. P.; Neddermann, B.; Schorer, T.; Callies, D.; Knorr, K.; Rohrig, K. und Saint-Dranan, Y.-M.: Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick auf 2025. dena-Netzstudie II Teil I (11.2010), 25.02.2019.
- [37] Windt, A. und Arnhold, O.: Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf. Studie im Auftrag des BMVI. Berlin (2020). https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/11/Studie_Ladeinfrastruktur-nach-2025-2.pdf, 14.04.2021.
- [38] Trost, T.; Sterner, M. und Bruckner, T.: Impact of electric vehicles and synthetic gaseous fuels on final energy consumption and carbon dioxide emissions in Germany based on long-term vehicle fleet modelling. Energy 141 (2017), S. 1215–1225. DOI: 10.1016/j.energy.2017.10.006.

- [39] *Trost, T.*: Erneuerbare Mobilität im motorisierten Individualverkehr. Modellgestützte Szenarioanalyse der Marktdiffusion alternativer Fahrzeugantriebe und deren Auswirkungen auf das Energieversorgungssystem. Stuttgart: Fraunhofer Verlag (2017). ISBN: 3839611296.
- [40] *Jörling, K.; Knapp, J.; Nabe, C.; Steinbacher, K.; Tiedemann, S.; Greve, M.; Tretschock, M.; Kippelt, S. und Burges, K.*: Verteilnetzausbau für die Energiewende. Elektromobilität im Fokus. Berlin (08.2019). <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/studie-verteilnetzausbau-fuer-die-energie-wende/>, 10.03.2023.
- [41] *Maier, U.*: Verteilnetzausbau für die Energiewende - Elektromobilität im Fokus. Schlussfolgerungen zu einer Studie von Navigant, dem Kompetenzzentrum Elektromobilität und RE-xpertsEnergiewende und RegulatoryAssistance Project. Erstellt im Auftrag von Agora Verkehrswende. Berlin (22.11.2019).
- [42] *50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; Tennet TSO GmbH und TransnetBW GmbH*: Szenariorahmen für den Netzentwicklungsplan Strom 2030 (Version 2019). Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. Berlin (01.2018). https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/%C3%9CNB-Entwurf_Szenariorahmen_2030_V2019.pdf, 25.03.2019.
- [43] *Xu, M. und Meng, Q.*: Optimal deployment of charging stations considering path deviation and nonlinear elastic demand. *Transportation Research Part B: Methodological* (2020), S. 120–142. DOI: 10.1016/j.trb.2020.03.001.
- [44] *Jia, L.; Hu, Z.; Song, Y. und Luo, Z.*: Optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations. In: IEEE (Hg.): 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference. Greenville, USA (2012). ISBN: 978-1-4673-1561-6.
- [45] *Wang, G.; Xu, Z.; Wen, F. und Wong, K. P.*: Traffic-Constrained Multiobjective Planning of Electric-Vehicle Charging Stations. *IEEE Transactions on Power Delivery* 28 (2013), S. 2363–2372. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2269142.
- [46] *Wang, Y.-W. und Lin, C.-C.*: Locating multiple types of recharging stations for battery-powered electric vehicle transport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 58 (2013), S. 76–87. DOI: 10.1016/j.tre.2013.07.003.
- [47] *Ma, J.; Cheng, L.; Li, D. und Tu, Q.*: Stochastic Electric Vehicle Network Considering Environmental Costs. *Sustainability* 10 (2018), S. 2888. DOI: 10.3390/su10082888.

- [48] *Ma, J.; Wang, H. und Tang, T.*: Stochastic Electric Vehicle Network with Elastic Demand and Environmental Costs. *Journal of Advanced Transportation* (2020), S. 1–11. DOI: 10.1155/2020/4169826.
- [49] *Efthymiou, D.; Antoniou, C.; Tyrinopoulos, Y. und Mitsakis, E.*: Spatial Exploration of Effective Electric Vehicle Infrastructure Location (2012). DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.06.1054.
- [50] *Pagany, R.; Marquardt, A. und Zink, R.*: Electric Charging Demand Location Model—A User- and Destination-Based Locating Approach for Electric Vehicle Charging Stations. *Sustainability* 11 (2019), S. 2301. DOI: 10.3390/su11082301.
- [51] *RWTH Aachen*: STELLA - Standortfindungsmodell für elektrische Ladeinfrastruktur. Internetpräsentation des Modells (2018). <http://www.isb.rwth-aachen.de/cms/ISB/Forschung/Projekte/~mdac/STELLA/>, 29.4.2019.
- [52] *Brost, W.; Funke, T. und Vallée, D.*: SLAM – Schnellladenetz für Achsen und Metropolen. In: Bogenberger, K. (Hg.): *Elektromobilität - aktuelle Chancen und Risiken der Umsetzung*. Jahresverkehrskongress 2016, 24./25.05.2016 in München. Berlin: DVGW, Deutsche Verkehrswissenschaftliche Gesellschaft e.V. (2016). ISBN: 978-3-942488-32-7.
- [53] *Steenhusen, N. G.*: Bitte wenden: Infrastruktur für neue Mobilität durch Data Science und KI. Niedersächsische Energietage 2018. Hannover (2018). https://www.efzn.de/fileadmin/documents/Niedersaechsische_Energietage/Vortr%C3%A4ge/2018/03_NET2018_FF2/06_Vortrag_Nanke_Gerhard_Steenhusen.pdf, 13.03.2023.
- [54] *Krajzewicz, D.; Hardinghaus, M.; Heinrichs, M. und Beige, S.*: Computing spatial charging needs using an agent-based demand model. In: Janusz Kacprzyk, Jan W. Owsinski (Hg.): *ISC 2017 : 15th Annual Industrial Simulation Conference: EUROSIS-ETI* (2017), S. 24–29.
- [55] *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*: Ausbaupotenzial – StandortTOOL. <https://www.standorttool.de/strom/ausbaupotenzial/>, 26.03.2021.
- [56] *Rojas Chapana, J. A.*: Aufruf zur Antragseinreichung zur Förderung von kommunalen und gewerblichen Elektromobilitätskonzepten (03/2021) gemäß 2.1 der Förderrichtlinie Elektromobilität des BMVI vom 14.12.2020 (2021).
- [57] *Rothfuchs, K.; Scheler, C. und Ludwig, C.*: Elektromobilitätsentwicklung auf städtischer Mikroebene. Ein Standort-Tool zur Dimensionierung und Allokation

- tion von e-Carsharing Flotten: Teilbericht C der Wissenschaftlichen Begleitforschung im Bundesförderprojekt "e-Quartier Hamburg". Hamburg: Hafen-City Universität (2018). ISBN: 9783941722705.
- [58] *Energynautics GmbH*: E-Mobility Power System Integration Symposium: paper and presentations of the 1st E-Mobility Power System Integration Symposium. Berlin (2017). <http://mobilityintegrationsymposium.org/downloads/>, 25.03.2019.
- [59] *Vasconcelos, M.; Kurth, M. und Schnettler, A.*: Grid Integration of Electric Fleets Using a Traffic Light Concept. In: *Energynautics GmbH* (Hg.): 1st E-Mobility PowerSystem Integration Symposium. Tagung in Berlin (2017).
- [60] *Kirpes, B.; Klingert, S.; Basmadjian, R. und Meer, H.* de: EV Charging Coordination to secure Power Grid Stability. In: *Energynautics GmbH* (Hg.): 1st E-Mobility PowerSystem Integration Symposium. Tagung in Berlin (2017).
- [61] *Shepero, M. und Munkhammar, J.*: Modelling Charging of Electric Vehicles Using Mixture of User Behaviours. In: *Energynautics GmbH* (Hg.): 1st E-Mobility PowerSystem Integration Symposium. Tagung in Berlin (2017).
- [62] *Burges, K. und Döring, M.*: The Vision of e-Mobility in the perspective of the existing power infrastructure (EMob17-284). In: *Energynautics GmbH* (Hg.): 1st E-Mobility PowerSystem Integration Symposium. Tagung in Berlin (2017).
- [63] *Bauer, R. und Papaafthymiou, G.*: E-Mobility and its future effect on demand and flexibility. Chances and challenges 2035 from a transmission system operator's perspective. In: *Energynautics GmbH* (Hg.): 1st E-Mobility Power-System Integration Symposium. Tagung in Berlin (2017).
- [64] *Statistische Ämter des Bundes und der Länder*: Regionaldatenbank Deutschland: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte am Arbeits- und Wohnort, Ein- und Auspendler über Gemeindegrenzen - Stichtag 30.06. - regionale Ebenen (2019). https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/data;sid=03A9AA66EAC2D8CBC58AE5AD4CB19636.reg1?operation=begriffsRecherche&suchanweisung_language=de&suchanweisung=Auspendler%28innen%29+%C3%BCber+Gemeindegrenzen+%28Wohnort%29&x=9&y=10, 19.06.2019.
- [65] *Information und Technik Nordrhein-Westfalen - Pressestelle* -: Bevölkerungsentwicklung in den kreisangehörigen Städten und Gemeinden Nordrhein-Westfalens 2018 bis 2040. https://www.it.nrw/sites/default/files/atoms/files/184_19_0.pdf, 18.11.2021.

- [66] *Bertelsmann Stiftung*: Daten zur Bevölkerungsprognose auf Gemeindeebene. Bevölkerungsvorausberechnung bis zum Jahr 2030 (2015). <https://www.wegweiser-kommune.de/statistik/bevoelkerungsstruktur>, 06.07.2020.
- [67] *Reback, J.; jbrockmendel; McKinney, W.; van Bossche, J. den; Augspurger, T.; Cloud, P.; Hawkins, S.; Roeschke, M.; gfyong; Sinhrks; Klein, A.; Hoefler, P.; Petersen, T.; Tratner, J.; She, C.; Ayd, W.; Naveh, S.; Garcia, M.; Darbyshire, J. H.; Schendel, J.; Shadrach, R.; Hayden, A.; Saxton, D.; Gorelli, M. E.; Li, F.; Zeitlin, M.; Jancauskas, V.; McMaster, A.; Battiston, P. und Seabold, S.*: pandas-dev/pandas: Pandas 1.4.0: Zenodo (2022). DOI: 10.5281/ZENODO.5893288.
- [68] *Harris, C. R.; Millman, K. J.; van der Walt, S. J.; Gommers, R.; Virtanen, P.; Cournapeau, D.; Wieser, E.; Taylor, J.; Berg, S.; Smith, N. J.; Kern, R.; Picus, M.; Hoyer, S.; van Kerkwijk, M. H.; Brett, M.; Haldane, A.; Del Río, J. F.; Wiebe, M.; Peterson, P.; Gérard-Marchant, P.; Sheppard, K.; Reddy, T.; Weckesser, W.; Abbasi, H.; Gohlke, C. und Oliphant, T. E.*: Array programming with NumPy. *Nature* 585 (2020), S. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.
- [69] *GRASS Development Team*: Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software. USA: Open Source Geospatial Foundation (2022). <https://grass.osgeo.org>, 14.03.2023.
- [70] *Rouault, E.; Warmerdam, F.; Schwehr, K.; Kiselev, A.; Butler, H.; Łoskot, M.; Szekeres, T.; Tourigny, E.; Landa, M.; Miara, I.; Elliston, B.; Kumar, C.; Plesea, L.; Morissette, D.; Jolma, A. und Dawson, N.*: GDAL: Zenodo (2022). DOI: 10.5281/ZENODO.5884351.
- [71] *Virtanen, P.; Gommers, R.; Oliphant, T. E.; Haberland, M.; Reddy, T.; Cournapeau, D.; Burovski, E.; Peterson, P.; Weckesser, W.; Bright, J.; van der Walt, S. J.; Brett, M.; Wilson, J.; Millman, K. J.; Mayorov, N.; Nelson, A. R. J.; Jones, E.; Kern, R.; Larson, E.; Carey, C. J.; Polat, İ.; Feng, Y.; Moore, E. W.; VanderPlas, J.; Laxalde, D.; Perktold, J.; Cimrman, R.; Henriksen, I.; Quintero, E. A.; Harris, C. R.; Archibald, A. M.; Ribeiro, A. H.; Pedregosa, F. und van Mulbregt, P.*: SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature methods* 17 (2020), S. 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- [72] *Forthomme, D.*: ipfn. Iterative proportional fitting. Iterative Proportional Fitting for Python with N dimensions (2016). <https://github.com/Dirguis/ipfn>, 12.03.2023.
- [73] *Dalkmann, H. und Böhler, S.*: Mobilität und Demographie im Wandel. In: Frevel, B. (Hg.): Herausforderung demografischer Wandel. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. Oktober 2004 (Oktober 2004), S. 275–293. ISBN: 978-3-531-14228-9. DOI: 10.1007/978-3-322-80562-1.

- [74] *Thomsen, G.*: Entwicklung eines Modells zur Regionalisierung von Ladestellen für Elektrofahrzeuge. Masterarbeit. Europa Universität Flensburg. Flensburg (16.06.2020).
- [75] *BertelsmannStiftung*: Demografischer Wandel. Publikationen (2021). <https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/tag/demografischer-wandel>, 20.01.2022.
- [76] *Baden-Württemberg - Statistisches Landesamt*: Bevölkerungsvorausrechnung im Kreisvergleich bis 2035. <https://www.statistik-bw.de/BevoelkGebiet/Vorausrechnung/Kreisdaten.jsp>, 20.01.2022.
- [77] *Bayerisches Landesamt für Statistik*: Demographischer Wandel in Bayern. https://www.statistik.bayern.de/statistik/gebiet_bevoelkerung/demographischer_wandel/index.html, 20.01.2022.
- [78] *Statistisches Bundesamt (Destatis)*: Künftige Bevölkerungsentwicklung in Deutschland (21.08.2019). https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/_inhalt.html, 20.01.2022.
- [79] *Statistisches Bundesamt (Destatis)*: GENESIS-Online: Statistik: 12421. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=statistikTabellen&selectionname=12421#abreadcrumb>, 20.01.2022.
- [80] *Statistisches Bundesamt (Destatis)*: Demografische Aspekte. Demografischer Wandel und Bevölkerungszahl (2023). <https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Demografischer-Wandel/textbaustein-taser-blau-bevoelkerungszahl.html>, 14.03.2023.
- [81] *Statistische Ämter des Bundes und der Länder*: Bevölkerung nach Geschlecht und Altersjahren - Stichtag 09.05.2011 - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte. Tabelle 12111-04-01-4 (2011). <https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/>, 20.04.2020.
- [82] *Statistisches Bundesamt (Destatis)*: Sterbetafel (Periodensterbetafel). Tabelle 12621-0001 (2020). <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>, 21.04.2020.
- [83] *Statistisches Bundesamt (Destatis)*: Geburtenziffern (Lebendgeborene je 1000 Frauen). Tabelle 12612-0008 (2020). <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>, 21.04.2020.
- [84] *Statistische Ämter des Bundes und der Länder*: Zu- und Fortzüge (über Gemeindegrenzen) nach Geschlecht und Altersgruppen. Tabelle 12711-01-03-5 (2020). <https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/>, 21.04.2020.

- [85] *Gauglitz, P.*: Anforderungen an Potentialermittlungen Erneuerbarer Energien auf kommunaler Ebene. Bachelorarbeit. RWTH Aachen. Aachen (2012).
- [86] *GfK Geomarketing*: GfK Bevölkerungsstrukturdaten Deutschland 2017. Daten zur soziodemografischen Struktur der Haushalte (2017).
- [87] *Kraftfahrt-Bundesamt*: Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Gemeinden (2019).
https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2019/fz3_2019_xlsx.xlsx?__blob=publicationFile&v=4, 01.05.2020.
- [88] *Frenzel, I., Jarass, J., Trommer, S., Lenz, B.*: Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung (2015).
http://www.dlr.de/vf/Portaldata/12/Resources/dokumente/projekte/pakt2/Ergebnisbericht_E-Nutzer_2015.pdf, 22.10.2019.
- [89] *Kuhnimhof, T. und Nobis, C.*: Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur. Bonn, Berlin (2018).
http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf, 11.02.2020.
- [90] *Technische Universität München*: Synthetic Population (2018).
<https://silo.zone/synPop.html>, 22.11.2021.
- [91] *Thommen, J.-P.*: Definition: Modell (19.02.2018). <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/modell-39245>, 01.02.2022.
- [92] *Statistisches Bundesamt (Destatis)*: Wirtschaftsrechnungen. Einkommens- und Verbrauchsstichprobe. Einkommensverteilung in Deutschland 2013 (2018). https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Einkommen-Einnahmen-Ausgaben/Publikationen/Downloads-Einkommen/einkommensverteilung-2152606139004.pdf?__blob=publicationFile, 22.04.2020.
- [93] *Beckman, R. J.; Baggerly, K. A. und McKay, M. D.*: Creating synthetic baseline populations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 30 (1996), S. 415–429. DOI: 10.1016/0965-8564(96)00004-3.
- [94] *Hettinger, T.*: Anpassung von Aktivitätenketten mittels wiederholter proportionaler Anpassung. Semesterarbeit für den MSc Angewandte Mathematik. ETH Zürich. Zürich (06.2007). <https://archiv.ivt.ethz.ch/docs/students/sa190.pdf>, 09.03.2023.
- [95] *Rose, A. N. und Nagle, N. N.*: Validation of spatiodemographic estimates produced through data fusion of small area census records and household

- microdata. *Computers, Environment and Urban Systems* 63 (2017), S. 38–49.
DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2016.07.006.
- [96] *Statistische Ämter des Bundes und der Länder*: Haushalte nach Haushaltsgroßen - Stichtag 09.05.2011 - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte. Tabelle 12111-31-01-4 (2011). <https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/>, 20.04.2020.
- [97] *Cyganski, R.; Schmidt, A. v. und Heldt, B.*: Generierung synthetischer Bevölkerungen für Berlin - Möglichkeiten und Grenzen. In: Nicole Mathys, Andreas Justen (Hg.): *Synthetische Populationen für die Politikberatung in der Schweiz*: Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Sektion Grundlagen (2017), 18–23.
- [98] *Schmidt, A. v.; Cyganski, R. und Krajzewicz, D.*: Generierung synthetischer Bevölkerungen für Verkehrsnachfragemodelle - Ein Methodenvergleich am Beispiel von Berlin. In: HEUREKA'17 - Optimierung in Verkehr und Transport. Stuttgart.: FGSV-Verlag (2017). ISBN: 978-3-86446-177-4.
- [99] *Frischmuth, F.; Gauglitz, P. und Bonin, M. v.*: LI 2.0 Workshop zum Unterauftrag Hamburg. Kassel, Hamburg (14.04.2021).
- [100] *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*: Georeferenzierte Adressdaten. <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/sonstige-geodaten/georeferenzierte-adressdaten-ga.html>, 22.02.2022.
- [101] *AdV*: Die amtlichen 3D-Gebäudemodelle in den Ausprägungen LoD1 und LoD2. München (2020). <http://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Weitere-Produkte/3D-Gebaeudemodelle-LoD/>, 03.02.2020.
- [102] *Tillmann, H.-G., Kleiber, W., Seit, W.*: Tabellenhandbuch zur Ermittlung des Verkehrswerts und des Beleihungswerts von Grundstücken (2017). https://www.reguvis.de/xaver/wertermittlerportal/start.xav?start=%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27wertermittlerportal_15009254923%27%5D#_wertermittlerportal_%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27wertermittlerportal_15009254923%27%5D__1580833809455, 04.02.2020.
- [103] *Statistisches Bundesamt (Destatis)*: Fortschreibung Wohngebäude- und Wohnungsbestand. Tabelle 31231-0001 (2020). <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>, 05.02.2020.
- [104] *Statistisches Bundesamt (Destatis)*: Haushalte in Mietwohnungen nach der Zahl der Wohnungen im Gebäude (2014). <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Tabellen/liste-haushaltsstruktur.html>, 06.02.2020.

- [105] *Statistische Ämter des Bundes und der Länder: ZENSUS2011 - Bevölkerungs- und Wohnungszählung 2011 - Ergebnisse des Zensus 2011 zum Download - erweitert* (14.06.2022). <https://www.zensus2011.de/DE/Home/Aktuelles/DemografischeGrunddaten.html>, 14.06.2022.
- [106] *Peters, A.; Doll, C.; Kley, F.; Möckel, M.; Plötz, P.; Sauer, A.; Schade, W.; Thielmann, A.; Wietschel, M. und Zanker, C.*: Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab153.pdf>, 18.11.2021.
- [107] *Wietschel, M.; Dütschke, E.; Funke, S.; Peters, A.; Plötz, P.; Schneider, U.; Roser, A. und Globisch, J.*: Kaufpotenzial für Elektrofahrzeuge bei sogenannten »Early Adoptern« – Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Karlsruhe (Juni 2012).
- [108] *Kühnapfel, J. B.*: Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (2019). ISBN: 978-3-658-25163-5. DOI: 10.1007/978-3-658-25164-2.
- [109] *LNTwww*: Statistische Abhängigkeit und Unabhängigkeit (30.11.2021). https://www.lntwww.de/Stochastische_Signaltheorie/Statistische_Abh%C3%A4ngigkeit_und_Unabh%C3%A4ngigkeit, 09.03.2023.
- [110] *Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein*: Hamburger Stadtteilprofile: Berichtsjahr 2020. InstantAtlas™ Bericht. https://www.statistik-nord.de/fileadmin/maps/Stadtteil_Profile_2020/atlas.html, 26.08.2022.
- [111] *Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV)*: Stadtteile - Hamburg. Esri Deutschland Open Data Portal. Stand 12/2021 (26.08.2022). https://opendata-esri-de.opendata.arcgis.com/datasets/8437e52c5e2d4963b6098accf571a891_0/explore?location=53.678621%2C9.369234%2C10.15, 26.08.2022.
- [112] *GfK Geomarketing*: Index Affinität Elektroautos je Haushalt. Datensatz (2019). vergleiche Kontakt der GfK zum Themenbereich unter <https://insights.gfk.com/gfk-white-paper-elektroauto-affinitaet-deutschland>, 09.03.2023.
- [113] *Benz, C.*: Austausch zur Affinität Elektromobilität. Telefonat von Christian Benz und Philip Gauglitz. Bruchsal, Kassel (05.09.2022).
- [114] *OpenStreetMap contributors*: Postleitzahlengebiete - OSM. Postleitzahlengebiete Deutschlands auf Basis OSM Daten mit Einwohnerzahl. Stand: 02.2022. Frei zur Verfügung unter der Open Database Licence. Einwohnerzahlen als Berechnungsgrundlage © Statistische Ämter des Bundes und der

- Länder. https://opendata-esri-de.opendata.arcgis.com/datasets/5b203df4357844c8a6715d7d411a8341_0/explore?location=53.647571%2C9.987561%2C11.07, 25.08.2022.
- [115] *OpenStreetMap*: Map data [data set] © OpenStreetMap contributors. Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>). www.openstreetmap.org, 01.09.2021.
- [116] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.*: Empfehlungen für Anlagen des ruhenden Verkehrs EAR 05. EAR 05. Köln: Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (2005). ISBN: 3937356460.
- [117] *Scheler, C.*: Austausch über öffentliche Ladeinfrastruktur in Hamburg und Modellannahmen. Telefonkonferenz, Teilnehmer Christian Scheler und Philip Gauglitz (03.02.2021).
- [118] *Moos, M.*: ÖPNVKarte. Öffentliche Verkehrsmittel - Weltweit (02.01.2021). <https://www.xn--pnvkarte-m4a.de/#8.2417;50.0824;15>, 09.04.2021.
- [119] *Schoen, A.; Ulfers, J.; Maschke, H.; Junge, E.; Bott, C.; Thurner, L. und Braun, M.*: Considering Control Approaches for Electric Vehicle Charging in Grid Planning. In: ETG, V. D. (Hg.): ETG-Fb. 163: ETG-Kongress 2021. Das Gesamtsystem im Fokus der Energiewende 18.-19.05.2021, Online-Veranstaltung. Berlin: VDE Verlag (2021). ISBN: 9783800755509.
- [120] *Bonin, M. v.; Dörre, E.; Al-Khzouz, H.; Braun, M. und Zhou, X.*: Impact of Dynamic Electricity Tariff and Home PV System Incentives on Electric Vehicle Charging Behavior: Study on Potential Grid Implications and Economic Effects for Households. *Energies* 15 (2022), S. 1079. DOI: 10.3390/en15031079.
- [121] *PostGIS*: About PostGIS (26.04.2022). <https://postgis.net/>, 26.04.2022.
- [122] *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*: Gemeindegrenzen 2017. Esri Deutschland Open Data Portal. © GeoBasis-DE / BKG 2017 (Daten verändert) (2017). <https://opendata-esri-de.opendata.arcgis.com/datasets/esri-de-content::gemeindegrenzen-2017/explore?location=51.099647%2C10.454033%2C7.41>, 04.05.2022.
- [123] *Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung*: Fachbeiträge - Raumordnungsprognose 2040 (06.01.2022). <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/fachbeitraege/raumentwicklung/raumordnungsprognose/2040/04-downloads.html;jsessionid=343F73259FE615AF17830B829421443E.live11293>, 09.03.2023.

- [124] *Landeshauptstadt Wiesbaden, Amt für Statistik und Stadtforschung*: Statistisches Jahrbuch 2018. Wiesbaden (2019). https://www.wiesbaden.de/medien-zentral/dok/leben/stadtportrait/Statistisches_Jahrbuch_2018.pdf, 07.05.2020.
- [125] *Horst, D.; Gauglitz, P. und Pape, C.*: Konzept zur Abbildung der räumlichen und zeitlichen Entwicklung von PV-Aufdachanlagen. In: Wittmann, J., Wolf, L., Ahlers, V., Koschel, A., Pump, R. (Hg.): Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften. Workshop Hannover 2018. Aachen: Shaker Verlag (2018).
- [126] *Google*: Stoßzeiten, Wartezeiten und Besuchsdauer - Google Unternehmensprofil-Hilfe (20.07.2022). <https://support.google.com/business/answer/6263531?hl=de>, 20.07.2022.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht Modellelemente mit Kapitel-Referenzen	28
Abbildung 2: Regionalisierung Bevölkerungsstruktur	37
Abbildung 3: Zuordnung von Haushalten zu Gebäuden	44
Abbildung 4: Stadtteile und Postleitzahlgebiete in Hamburg [110; 114; 115] ...	55
Abbildung 5: Schematische Darstellung der punktförmigen Bedarfe	59
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Bedarfe und Parkflächen	64
Abbildung 7: Umwandlung Vektor in Raster	65
Abbildung 8: Rasterrechnung (vergleichbare Abbildung in [14])	66
Abbildung 9: Zubaureihenfolge der Ladestellentypen, schematisch	72
Abbildung 10: Verstärkter Zubau öffentlicher Ladeinfrastruktur, schematisch ...	72
Abbildung 11: Szenarienbildung	73
Abbildung 12: Modellstruktur	79
Abbildung 13: Modellierter Altersstruktur in Hamburg	81
Abbildung 14: Demografischer Wandel Deutschland, Gemeindegrenzen [122].	82
Abbildung 15: Bevölkerungsänderung, Modell u. Vergleichsdaten [123]	83
Abbildung 16: Elektrofahrzeuge je Einwohner 2040, Gemeindegrenzen [122] ..	85
Abbildung 17: Auflösung Straßenabschnitte [86] und Gebäude	87
Abbildung 18: Sozioökonomische Attribute der Haushalte	87
Abbildung 19: Validierung Bevölkerungsstruktur: Datensätze [86; 105]	88
Abbildung 20: Erster Schritt der Nutzwertanalyse: Haushalte	91
Abbildung 21: Heimpladen: Nutzwert und Zufallsziehung	93
Abbildung 22: Eingangsdaten Rasterrechnung für (halb-) öffentliches Laden	102
Abbildung 23: Ergebnisse Rasterrechnung für (halb-) öffentliches Laden	103
Abbildung 24: (Halb-) öffentliche Ladestellen pro Fläche, Hamburg	104
Abbildung 25: (Halb-) öffentliches Laden je Haushalt, Hamburg	105
Abbildung 26: Verfahrensvergleich (halb-) öffentliches Laden, Wiesbaden	106
Abbildung 27: Schnittstelle: Regionalisierte Ladestellen und Verteilnetz	111
Abbildung 28: Anwendung Netzberechnung: Leitungsauslastung, nach [13] ..	121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anteile Ladestellentypen nach [37].....	34
Tabelle 2: Randsummen der sozioökonomischen Attribute [74]	38
Tabelle 3: Vergleichsstichprobe auf Bundesebene, gruppierte Werte aus [92]...38	
Tabelle 4: Beispiele für Randsummen eines Straßenabschnittes.....	39
Tabelle 5: IPF, Matrix nach dem zweiten Iterationsschritt.....	40
Tabelle 6: Sozioökonomik Elektrofahrzeugkäufer:in [88] u. Durchschnitt [86]...49	
Tabelle 7: Attribute und Ausprägungen nach [13].....	50
Tabelle 8: Keys/Values für Parkplätze, Teil 1 [14]	61
Tabelle 9: Keys/Values für Parkplätze, Teil 2 [14]	62
Tabelle 10: Verfahrensvergleich öffentliches Laden (vergleiche [14])	69
Tabelle 11: Spalten der Datenbank-Tabelle für das Schnittstellendesign.....	75
Tabelle 12: Fahrzeuge und Ladestellen auf Gemeindeebene, Eingangsdaten	84
Tabelle 13: Fahrzeuge und Ladestellen auf Gemeindeebene, Ergebnisse	84
Tabelle 14: Randsummen und Einzelwerte der sozioökonomischen Attribute...86	
Tabelle 15: Datenvergleich Attributshäufigkeiten Wiesbaden [74; 96; 124]	86
Tabelle 16: Korrelationskoeffizienten Bevölkerungsdaten	89
Tabelle 17: Korrelationskoeffizienten auf Ebene der Stadtteile	94
Tabelle 18: MiD-Fahrten nach Wegezielen [89], Auswertung in [14].....	98
Tabelle 19: OSM-keys und -values für die POI [14].....	99
Tabelle 20: Bedarf öffentl. Laden Hamburg, vgl. analog [14] für Wiesbaden ...	101
Tabelle 21: Verfahrensvergleich qualitative Aspekte	108
Tabelle 22: Verfahrensvergleich Korrelationskoeffizienten [14]	108

Abkürzungsverzeichnis

AGS – Amtlicher Gemeindeschlüssel

BDEW – BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.

DLR - Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.

EFH – Einfamilienhaus / Einfamilienhäuser

Fraunhofer IEE – Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und
Energiesystemtechnik IEE

GIS – Geoinformationssystem(e)

IPF – Iterative-Proportional-Fitting(-Algorithmus)

MFH – Mehrfamilienhaus / Mehrfamilienhäuser

MiD – Mobilität in Deutschland (Studie/Datensätze)

OSM – OpenStreetMap

Pkw – Personenkraftwagen

POI – Point(s) of Interest

PV – Photovoltaik

SLAM – Schnellladenetz für Achsen und Metropolen (Forschungsprojekt)

SQL – Structured Query Language

STELLA - Standortfindungsmodell für elektrische Ladeinfrastruktur

TCO - Total-Cost-of-Ownership

ZFH – Zweifamilienhaus / Zweifamilienhäuser

Python-Bibliotheken

Folgende Python-Bibliotheken wurden genutzt:

- pandas [67]
- NumPy [68]
- GRASS [69]
- GDAL [70]
- SciPy [71]
- ipfn [72]

Das entwickelte Modell wurde aufgrund des Rechenumfangs für verschiedene Teilschritte auf verschiedenen physischen und virtuellen Maschinen eingesetzt. Versionen der oben genannten Bibliotheken können deswegen abweichen.