



**Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin**

University of Applied Sciences

Entwicklung eines Verortungstools zur Ladestandortbestimmung von Elektrofahrzeugen

Masterarbeit

Regenerative Energien

Fachbereich 1

vorgelegt von

Moritz Schiel

Datum:

Berlin, 24.04.2022

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens Fortmann

Zweitgutachter: M.Sc. Tim Röpcke

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Ziel und Aufbau	1
2 Grundlagen	2
2.1 Privatverkehr	2
2.2 Elektromobilität.....	2
2.3 Stromnetz.....	4
2.4 Ladeinfrastruktur	5
2.5 Simulationstools	6
2.5.1 SimBEV: Ermittlung von Ladebedarfen	6
2.5.2 SpiceEV: Anwendung von Ladestrategien.....	6
2.5.3 HPC-Tool: Verteilung von Schnellladepunkten	7
2.5.4 eDisGo: Bestimmung der Netzauslastung	7
2.6 Daten	8
2.6.1 Mobilität in Deutschland	8
2.6.2 Open Street Map.....	8
2.6.3 Zensus 2011	9
2.6.4 Verkehrsdaten.....	9
2.6.5 Ladesäulen	9
3 Methodik	10
3.1 Datenaufbereitung.....	10
3.1.1 Verkehrsdaten.....	10
3.1.2 HPC Ladepunkte.....	12
3.1.3 Public Ladepunkte.....	13
3.2 Anpassung von SimBEV	14
3.2.1 Ausgabe einer Lastzeitreihe	14
3.2.2 Use Case	15
3.2.3 Metadaten	15

3.3	Verortungstool TracBEV	15
3.3.1	Use Case HPC	16
3.3.2	Use Case Public	18
3.3.3	Use Case Home	19
3.3.4	Use Case Work	21
3.3.5	Generelles	21
3.4	Testszenarien	23
3.4.1	Szenario Referenznetzgebiete	23
3.4.2	Szenario Berlin	27
3.4.3	Szenario Frankfurt	27
4	Auswertung	28
4.1	Szenario Referenznetzgebiete	28
4.1.1	HPC	28
4.1.2	Public	31
4.1.3	Home	32
4.1.4	Work	34
4.1.5	Netzverfügbarkeit	36
4.1.6	Netzverträglichkeit	38
4.2	Szenario Berlin	40
4.3	Szenario Frankfurt	43
5	Diskussion	45
5.1	Verbesserung der Use Cases	45
5.1.1	HPC	45
5.1.2	Public	46
5.1.3	Home	46
5.1.4	Work	47
5.2	Netz	47
6	Zusammenfassung und Ausblick	48
7	Literaturverzeichnis	49
8	Eigenständigkeitserklärung	52
A.	Anhang	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Well-to-Wheel Effizienz verschiedener Antriebe [7].....	3
Abbildung 3.1: Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke auf deutschen Bundesstraßen und Autobahnen.....	11
Abbildung 3.2: Normierte Potenziale der HPC-Standorte in der TracBEV-Eingangsdatei.....	13
Abbildung 3.3: HPC-Ladepunkte in Berlin.....	13
Abbildung 3.4: Ergebnis der Clusterbildung von POI, Berlin-Adlershof.....	14
Abbildung 3.5: Ablauf der Funktion hpc.....	18
Abbildung 3.6: Ablauf der Funktion public.....	19
Abbildung 3.7: Ablauf der Funktion home.....	20
Abbildung 3.8: Ablauf der Funktion work.....	21
Abbildung 3.9: Grobe Struktur von TracBEV.....	22
Abbildung 3.10: Aufbau von main.py.....	22
Abbildung 3.11: Lage der Referenznetzgebiete in Deutschland.....	24
Abbildung 3.12: Netzgebiet 1690 im Vergleich mit AGS-Regionen.....	25
Abbildung 3.13: Aufbau der Toolchain.....	26
Abbildung 4.1: TracBEV-Ergebnisse für das Netzgebiet 2534.....	28
Abbildung 4.2: HPC-Standorte in der Netzregion 177.....	29
Abbildung 4.3: HPC-Standorte in der Netzregion 176.....	30
Abbildung 4.4: HPC-Standorte in der Netzregion 1690.....	30
Abbildung 4.5: TracBEV-Ergebnisse für den Use Case Public in Region 177.....	31
Abbildung 4.6: TracBEV-Ergebnisse für den Use Case Public in Region 1811.....	32
Abbildung 4.7: TracBEV-Ergebnisse für den Use Case Home in Region 1056.....	33
Abbildung 4.8: Ladestandorte einer Ortschaft im Use Case Home.....	33
Abbildung 4.9: Eingangsdaten einer Ortschaft für den Use Case Home.....	34
Abbildung 4.10: Landwirtschaftliche Flächen im Use Case Work.....	35
Abbildung 4.11: TracBEV-Ergebnisse für den Use Case Work in Region 2534.....	35
Abbildung 4.12: TracBEV-Ergebnisse für den Use Case Work in Region 1690.....	36
Abbildung 4.13: Netzverfügbarkeit in Region 1056.....	37
Abbildung 4.14: Netzverfügbarkeit in Region 2534.....	38
Abbildung 4.15: Leistungsfluss in der Woche mit maximaler Residuallast in Region 176.....	39
Abbildung 4.16: Leistungsfluss in der Woche mit minimaler Residuallast in Region 176.....	39
Abbildung 4.17: Vergleich der HPC-Standorte aus TracBEV und dem Verortungstool.....	40
Abbildung 4.18: Vergleich der Public-Standorte aus TracBEV und dem Verortungstool.....	41
Abbildung 4.19: Ergebnisse des Use Case Home für Berlin in TracBEV.....	42
Abbildung 4.20: Ergebnisse des Use Case Home für Berlin im Verortungstool.....	42
Abbildung 4.21: Ergebnisse des Use Case Work für Berlin.....	43
Abbildung 4.22: Ergebnisse des Use Case Home in Frankfurt.....	44
Abbildung 4.23: Unterschiede zwischen TracBEV und dem Validierungsdatensatz für den Use Case Home.....	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Kennwerte von E-Pkw.....	4
Tabelle 2.2: Spannungsebenen des deutschen Stromnetzes [11]	4
Tabelle 2.3: Ladeinfrastruktur nach Use Case	6
Tabelle 2.4: Ladestrategien in SpiceEV	7
Tabelle 2.5: OSM-Schlüssel und Werte für genutzte Datensätze	9
Tabelle 3.1: Aufbau der gefilterten Straßendaten mit Beispieleinträgen.....	11
Tabelle 3.2: Datensätze für die Bewertung möglicher Schnellladestandorte	12
Tabelle 3.3: Aufbau der Lastzeitreihe in SimBEV	15
Tabelle 3.4: Aufteilung der Wegzwecke in Use Cases.....	15
Tabelle 3.5: Methodiken zur Standortauswahl in TracBEV und dem Prototypen.....	16
Tabelle 3.6: Aufbau der TracBEV-Eingangsdaten für den Use Case HPC.....	17
Tabelle 3.7: Aufbau der Clusterpunkte im Use Case Public.....	18
Tabelle 3.8: Kodifizierung der Gebäudetypen im Zensus.....	20
Tabelle 3.9: Aufbau der Eingangsdaten für den Use Case Home	20
Tabelle 3.10: Aufbau eines TracBEV-Szenarios	22
Tabelle 3.11: Eigenschaften der Referenznetzgebiete.....	23
Tabelle 3.12: Hochlaufzahlen für die Netzregionen nach Szenario NEP C 2035	25
Tabelle 3.13: Einstellung für die SimBEV-Simulation im Testszenario.....	26
Tabelle 3.14: Hochlaufzahlen für Berlin im Jahr 2035.....	27
Tabelle 3.15: Hochlaufzahlen für Frankfurt am Main im Jahr 2035	27
Tabelle 4.1: Abregelungsbedarf der einzelnen Komponenten im Netz 176 nach Szenario NEP C 2035	39
Tabelle A.1: Inhalt der Variablen config_dict.....	53
Tabelle A.2: Inhalt der Variablen uc_dict	54
Tabelle A.3: Fahrzeugdaten in SimBEV	54
Tabelle A.4: Auszug aus der Gewichtungstabelle für POI.....	54

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current, Wechselstrom
AGS	amtlicher Gemeindeschlüssel
BEV	Battery Electric Vehicle
CO2	Kohlenstoffdioxid
DC	Direct Current, Gleichstrom
EE	Erneuerbare Energien
HPC	High Power Charging, Schnellladen
MS	Mittelspannung
NEP C 2035	Netzentwicklungsplan 2035, Variante C
NS	Niederspannung
OSM	Open Street Map
PHEV	Plug-In Hybrid Vehicle
Pkw	Personenkraftwagen
POI	Point of Interest
RLI	Reiner Lemoine Institut
V2G	Vehicle-to-Grid

1 Einleitung

1.1 Motivation

Nach den Klimazielen der Bundesregierung sollen CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2030 um 65% gegenüber dem Vergleichsjahr 1990 gesenkt werden [1]. Für den Sektor Verkehr gibt das Bundes-Klimaschutzgesetz eine Reduktion von ca. 43% vor. Dies stellt eine besondere Herausforderung dar, da die Emissionswerte auf dem gleichen Niveau wie vor 20 Jahren sind [2]. Um kurzfristig die Klimabilanz des Verkehrssektors zu verbessern, wird hauptsächlich auf die Elektromobilität gesetzt. Als Teil der Sektorenkopplung werden Fahrzeuge zu Stromverbrauchern und sind dabei auf klimafreundliche Stromerzeugung und den Ausbau des deutschen Stromnetzes angewiesen. Eine Voraussetzung zur Verbindung vom Energiesektor und dem Straßenverkehr ist die Installation von öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur. In Anbetracht der Bedeutung von Ladeinfrastruktur im zukünftigen Energiesystem Deutschlands ist die Prognose des Ladebedarfs entscheidend für einen effizienten Ausbau. Dabei spielt sowohl die zeitliche als auch die räumliche Auflösung dieser Last eine Rolle, um Netzbetrachtungen durchzuführen.

1.2 Ziel und Aufbau

Das Reiner Lemoine Institut (RLI) hat mehrere Open Source Python Tools im Bereich der Ladeinfrastrukturplanung entwickelt:

- Im Tool SimBEV [3] werden Fahrprofile aus Mobilitätsdaten erstellt, um den Ladebedarf in einer Region zu bestimmen.
- Das Tool SpiceEV [4] ist auf das Anwenden von Ladestrategien spezialisiert.

Die Verortung von Ladepunkten in einer Region wird als Teil der Tool Chain in einem weiteren Programm betrachtet. Dieses Verortungstool namens TracBEV [5] erlaubt die geographische Betrachtung von Ladeinfrastruktur. Ziel der Abschlussarbeit ist es, einen vorhandenen Prototyp des Tools auszubauen und die Methodik zur Platzierung der Ladepunkte zu verbessern.

Im ersten Teil der Arbeit werden die Grundlagen zu Ladevorgängen im privaten Pkw-Bereich erläutert. Dies umfasst das Verkehrsaufkommen in Deutschland, technische Aspekte der Elektromobilität und die Einbindung von Ladeinfrastruktur in das Stromnetz. Anschließend werden die vorhandenen Simulationstools vorgestellt. Die Konzeptionierung und Entwicklung von TracBEV werden im Kapitel Methodik beschrieben. Um TracBEV zu validieren, werden mehrere Testszenarien simuliert. Anhand echter Kartendaten werden die gewählten Standorte kritisch betrachtet und mit den Ergebnissen des Vorgängertools und anderer Methodiken verglichen. Zudem wird der Einfluss der platzierten Ladeinfrastruktur auf verschiedene Netze in einem Anwendungsbeispiel analysiert. Abschließend wird ein Fazit aus dem Projekt gezogen und ein Fahrplan für die Weiterentwicklung von TracBEV und der Tool Chain erstellt.

2 Grundlagen

2.1 Privatverkehr

Die Betrachtung von Ladeinfrastruktur in der bestehenden Tool Chain fokussiert sich auf die Versorgung von Pkw. Die zwei maßgeblichen Gründe dafür sind die Relevanz der privaten Mobilität in Deutschland sowie die Verfügbarkeit öffentlicher Daten.

Der motorisierte Individualverkehr bildete im Jahr 2019 mit 78,4% [6] den größten Anteil an der Personenverkehrsleistung, die sich aus dem Produkt von Personenzahl und zurückgelegter Strecke ergibt. Darunter fallen alle motorisierten Fahrzeuge, deren Zweck der individuelle Personentransport ist. Dem gegenüber stehen der öffentliche Straßenpersonenverkehr und Schienen- sowie Flugverkehr. Aus diesen Bereichen würde für die Betrachtung batterieelektrischer Fahrzeuge nur der öffentliche Verkehr in Frage kommen. Busse stellen einen speziellen Fall bei der Ladeinfrastrukturplanung dar. Im Nahverkehr wird das Ladekonzept direkt vom Betreiber entwickelt. Für den Reiseverkehr erscheinen Installationen an Busbahnhöfen sowie Schnellladehubs auf Raststätten als sinnvolle Anwendungen.

Eine weitere Baustelle bei der Mobilitätswende befindet sich beim Wirtschaftsverkehr. Dieser hat allerdings stark abweichende Anforderungen an Ladeinfrastruktur im Vergleich zum Individualverkehr. Außerdem erlaubt die geringe Verfügbarkeit öffentlicher Daten keine aussagekräftigen Ergebnisse. Zur Ermittlung von Ladebedarfen werden unter anderem Fahrprofile und eine Entwicklung der Anzahl an Elektrofahrzeugen benötigt. In der Privatwirtschaft werden diese Daten entweder nicht aufgezeichnet oder werden von den Unternehmen nicht frei zur Verfügung gestellt. In einer Abwägung von Effekt auf die Mobilitätswende sowie der Verfügbarkeit von Daten wird sich bei dieser Betrachtung auf private Pkw beschränkt. Die Datenbasis für den Privatverkehr wird in Kapitel 2.6.1 vorgestellt.

2.2 Elektromobilität

Eine wichtige Komponente in den bereits erwähnten Simulationstools sind die batterieelektrischen Fahrzeuge (BEV). Diese sollen nach Stand der Technik mit repräsentativen Kennwerten modelliert werden. Relevant sind die Speicherkapazität und Ladeleistung der Fahrzeugbatterie sowie der Energieverbrauch beim Fahren. Für die Energiewende sind BEV besonders interessant auf Grund der hohen Well-to-Wheel Effizienz (Abbildung 2.1). Diese Kennzahl gibt das Verhältnis von der tatsächlichen Fahrleistung zur eingesetzten Menge des ursprünglichen Energieträgers an. Sie fungiert als Wirkungsgrad der gesamten Wirkungskette. BEV liefern die beste Effizienz, wenn Strom als Primärenergieträger genutzt wird. Wasserstofffahrzeuge (FCEV) schneiden hier deutlich schlechter ab. Herkömmliche Verbrenner, die mit künstlichen Kraftstoffen betankt werden, weisen die niedrigste Effizienz auf. Selbst wenn die Kraftstoffsynthese ignoriert wird, liegt der Wirkungsgrad mit 27% deutlich unter den 69% der BEV.

Grundlagen

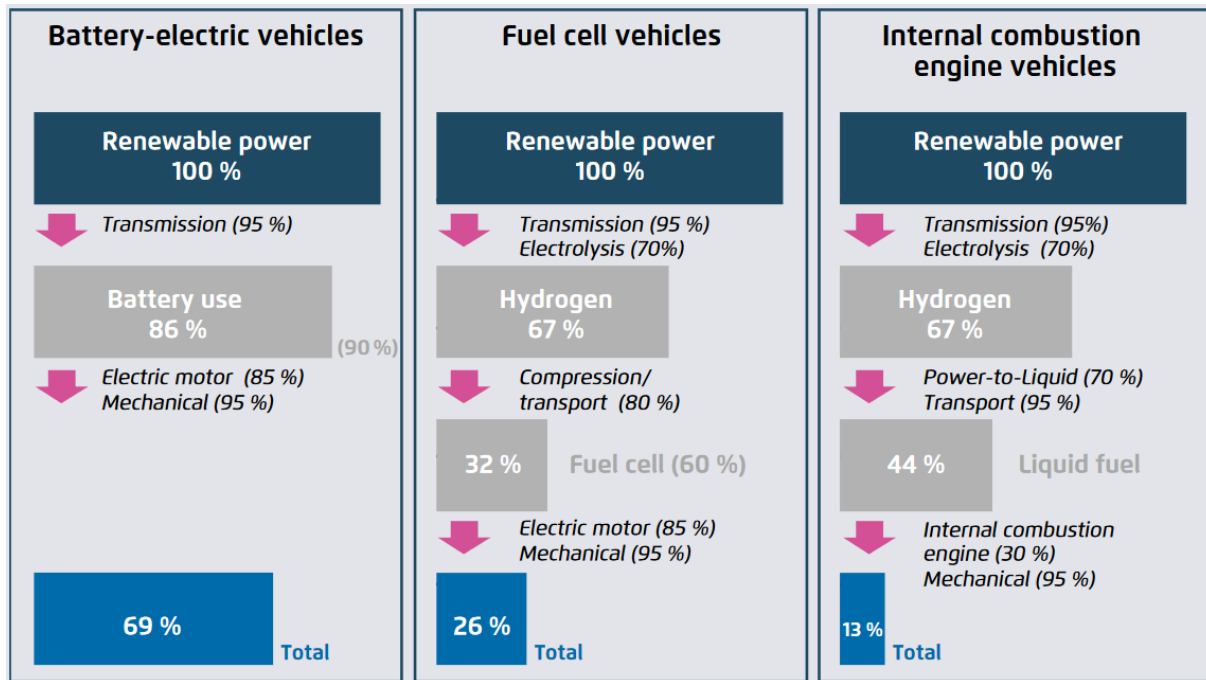


Abbildung 2.1: Well-to-Wheel Effizienz verschiedener Antriebe [7]

Alle Elektrofahrzeuge nutzen einen Elektromotor. Dieser besteht mit einem hohen Wirkungsgrad und einem relativ drehzahlunabhängigen Moment. Er besteht aus weniger Einzelteilen als ein Verbrennungsmotor, auch mehrstufige Getriebe werden nicht benötigt. Für den Nutzer ergeben sich ein geringerer Wartungsaufwand und ein entspanntes Fahrgefühl [8].

Elektrofahrzeuge werden nach Art des Antriebs und des Energiespeichers kategorisiert [9]. BEVs nutzen interne Batterien zur direkten Speisung des Motors. Brennstoffzellenfahrzeuge besitzen einen Wasserstofftank und eine Brennstoffzelle, die Wasserstoff in Strom umwandelt. Hybride sind eine Mischung aus Verbrenner und Batteriefahrzeug. Unterformen unterscheiden sich nach Rolle und Größe des Batteriespeichers sowie der Konfiguration der Motoren. Relevant für die Ladeinfrastrukturplanung sind von letzteren nur die sogenannten Plug-In Hybride (PHEV). Diese erlauben eine externe Beladung des Batteriespeichers und können auch vollelektrisch betrieben werden.

Fahrzeuge mit extern beladbaren Batterien sind aktuell fast ausschließlich auf unidirektionales Laden ausgelegt. Abhängig vom eingebauten Umrichter können sie aber auch bidirektional laden [10]. Diese auch als Vehicle-to-Grid (V2G) bezeichnete Technologie erlaubt es, dass Speicher von Elektroautos nicht nur beladen, sondern auch in das Netz entladen werden können. Wenn V2G-fähige Autos zum Laden angeschlossen sind, können sie zur Netzstabilität beitragen. Dies wird besonders bei einem von Erneuerbaren Energien geprägten Netz interessant, da sowohl Windkraft als auch Photovoltaik stark schwankende Einspeisung liefern.

Für die Modellierung von Fahrzeugen sind folgende Größen besonders relevant:

Grundlagen

Tabelle 2.1: Kennwerte von E-Pkw

Kenngröße	Typischer Wert BEV	Typischer Wert PHEV
Speicher	30 - 90 kWh	15 - 30 kWh
Verbrauch	10 - 20 kWh / 100 km	14 - 22 kWh / 100 km
Max. Ladeleistung	11 – 22 kW _{AC} , 50 - 150 kW _{DC}	3,7 – 11 kW _{AC}
V2G-Fähigkeit	eher nein	nein

BEV und PHEV sind die einzigen Elektro-Pkw, die ihre Energie direkt aus dem Stromnetz beziehen. Da die in Tabelle 2.1 zusammengefassten Kennwerte eine große Spannweite haben, werden Fahrzeuge in die Kategorien Mini, Medium und Luxury aufgeteilt. Ein Pkw des Typs BEV Mini könnte zum Beispiel einen Speicher von 30 kWh und Ladeleistungen von 11 kW_{AC} und 50 kW_{DC} besitzen. Alle in der Simulation genutzten Werte sind in Tabelle A.3 zu finden.

2.3 Stromnetz

Eine erfolgreiche Energiewende kann nur funktionieren, wenn das gesamte System berücksichtigt wird. Bei der Elektrifizierung des Verkehrs muss die zusätzliche Last auf den Energiesektor und vor allem auf das Stromnetz eingeplant werden. Für die Betrachtung der Netzbelastung durch Ladeinfrastruktur werden nachfolgend Grundlagen zum deutschen Netz vorgestellt.

Das deutsche Stromnetz besteht aus dem Übertragungsnetz und mehreren Verteilnetzen. Die Netzebenen und daran angeschlossene Netzteilnehmer sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Tabelle 2.2: Spannungsebenen des deutschen Stromnetzes [11]

Netzebene	Spannung	Verbraucher	Erzeuger
Übertragungsnetz	220 – 380 kV	-	große konventionelle und Erneuerbare-Energien-Kraftwerke (EE-Kraftwerke)
Verteilnetz Hochspannung	60 – 110 kV	Städte, stromintensive Industrie	mittlere konventionelle und EE-Kraftwerke
Verteilnetz Mittelspannung	6 – 30 kV	Kleinstädte, Industrie	EE-Anlagen, kleine Kraftwerke
Verteilnetz Niederspannung	230 / 400 V	Haushalte, Gewerbe	kleine EE-Anlagen

Die Netzebenen sind durch Transformatoren verschiedener Größenordnungen verbunden. Begleitet werden sie von Schalt-, Mess- und Regelungstechnik.

Die Energiewende führt zu vielfältigen Problemen für die Netzbetreiber [12]. Das Netz wurde ursprünglich so konzipiert, dass die Niederspannungsebene eine reine Last darstellt. Durch den Zubau von Photovoltaikanlagen auf privaten Dächern kann sich allerdings durch eine hohe regenerative Produktion von Strom der Leistungsfluss umdrehen. Dies führt zu einer Spannungssteigerung auf der Netzebene, die für angeschlossene Elektrogeräte sowie die Netzkomponenten an sich schädlich sind. Außerdem kann an Tagen niedriger Produktion der Stromverbrauch auf Grund der Sektorenkopplung im Vergleich zum heutigen Netz steigen. Zusätzliche Verbraucher im Niederspannungsbereich sind vor allem E-Pkw sowie Wärmepumpen, die zu einer starken Erhöhung der Spitzenlast führen. Konventionell werden solche Probleme über einen physischen Ausbau des Netzes gelöst, zum Beispiel mit zusätzlichen Leitungen oder einer neuen Ortsnetzstation. Bei Spannungsproblemen kann aber auch die Effizienz des bestehenden Netzes durch intelligente Betriebsmittel erhöht werden, die auf den Zustand des Netzes reagieren und durch Spannungs- oder Stromregelung den Lastfluss optimieren [13]. Als weitere Maßnahme können sowohl Lasten als auch Generatoren abgeregelt werden, also nicht ihre gewünschte Leistung beziehen oder einspeisen. Eine Nutzung der Tool Chain zur Betrachtung von Netzproblemen wird in Kapitel 4.1.6 beispielhaft durchgeführt.

2.4 Ladeinfrastruktur

Ladeinfrastruktur verbindet das Stromnetz mit der Elektromobilität und bildet eine wichtige Komponente der Simulationstools. Sie kann nach Technik, Leistung und Standort in mehrere Kategorien [14] aufgeteilt werden. Schnellladestationen verwenden Gleichstromtechnik (DC), um mit hohen Leistungen direkt die Batterie zu laden. Die Umwandlung vom Wechselstrom (AC), der aus dem Netz kommt, geschieht in der Ladesäule. Der große Vorteil der DC-Ladesäulen ist die Möglichkeit, einen leeren Akku schnell zu befüllen. Sie sind vor allem an Autobahnen notwendig, damit E-Pkw im Verlauf einer Rastpause einen hohen Ladestand erreichen. Bei einem angenommenen Verbrauch von 15 kWh/100 km kann an einer Ladesäule mit 150 kW Leistung innerhalb einer halben Stunde genug Energie für ca. 500 km Strecke bezogen werden. Dies setzt einen entsprechend großen internen Energiespeicher voraus. Bei dieser Betrachtung wird von einer konstanten Ladeleistung ausgegangen, die in Realität je nach Batteriemangement und verbauter Technik abgeregelt wird [15]. Bei DC-Ladung wird die Leistung meist ab einem Akkustand von 80% stark reduziert, um die Batterie zu schützen.

Bei der AC-Ladetechnik findet die Umwandlung im Auto statt. Sie sind damit auf Umrichter im Auto angewiesen, die oft nur eine Leistung von 11 kW oder 22 kW erlauben. AC-Ladepunkte sind deutlich leichter zu installieren, da sie meist keinen besonderen Netzanschluss brauchen, sondern über ein normales Hausnetz betrieben werden können. Außerdem sind diese Ladepunkte sehr kompakt, da sie auf kleinere Leistungen ausgelegt sind und keinen Umrichter benötigen. Diese Ladepunkte eignen sich zum Laden bei längeren Parkzeiten oder wenn nur kurze Strecken gefahren werden und keine komplette Füllung der Batterie notwendig ist.

Für die Tool Chain werden vier Anwendungsfälle (Use Cases) von Ladevorgängen definiert. Zu sehen sind diese in Tabelle 2.3.

Tabelle 2.3: Ladeinfrastruktur nach Use Case

Use Case	Leistung in kW	Netzebene
High Power Charging (HPC)	50 – 350 (DC)	Mittelspannung (MS)
Public	11 – 22 (AC)	Niederspannung (NS)
Home	3,7 – 11 (AC)	NS
Work	3,7 – 22 (AC)	NS/MS

Der Use Case **HPC** bildet öffentlich zugängliche Schnellladeinfrastruktur ab. Diese befindet sich oft an Verkehrsachsen. Aufgrund der hohen Leistungen wird ab zwei Ladepunkten ein Anschluss am Mittelspannungsnetz benötigt. **Public** enthält alle öffentlichen Ladepunkte, die auf AC-Technik basieren. Diese befinden sich oft auf Parkplätzen oder am Straßenrand. **Home** beschränkt sich auf Ladeinfrastruktur, die zuhause an privaten Stellplätzen installiert ist. **Work** bezieht sich auf eine vom Arbeitgeber zur Verfügung gestellte Lademöglichkeit auf Mitarbeiterparkplätzen.

2.5 Simulationstools

Bei der Erstellung der Eingangsdaten für TracBEV [5] sowie der Ergebnisauswertung werden mehrere Open-Source Tools genutzt, die am RLI entwickelt wurden. In diesem Kapitel werden die einzelnen Tools kurz vorgestellt.

2.5.1 SimBEV: Ermittlung von Ladebedarfen

Das Tool SimBEV [3] synthetisiert Fahrprofile von Pkw auf Grundlage der Verkehrserhebung Mobilität in Deutschland 2017 (Kapitel 2.6.1). Simulationsparameter werden in den Szenario-Dateien angepasst. Zu den wichtigsten Parametern gehören die Anzahl der Fahrzeuge nach Region und Fahrzeugtyp, der Simulationszeitraum und die technischen Kennwerte. SimBEV erstellt daraus für jedes Fahrzeug eine csv-Datei mit allen Fahrten und Standzeiten. Darin enthalten sind Informationen zum Batteriestand, der Verfügbarkeit und Leistung von Ladepunkten sowie dem Zweck der Fahrt. Zusätzlich können Ladezeitreihen aufgeteilt nach Wegzweck oder den definierten Use Cases aus den Fahrzeugprofilen abgeleitet werden. Letztere dienen als Eingangsdaten für TracBEV. Weiterhin benötigt TracBEV die Metadaten-Datei der SimBEV-Simulation, die Informationen über das genutzte Szenario speichert.

2.5.2 SpiceEV: Anwendung von Ladestrategien

SpiceEV (Simulation Program for Individual Charging Events of Electric Vehicles) [4] wird genutzt, um Ladestrategien anzuwenden und diese zu vergleichen. Als Input dienen eigenständig erzeugte Fuhrparks oder SimBEV-Ergebnisse.

Folgend sind eine Auswahl der implementierten Ladestrategien [16] erklärt:

Tabelle 2.4: Ladestrategien in SpiceEV

Ladestrategie	Erklärung
Greedy	Laden mit maximal möglicher Leistung, bis Batterie gefüllt ist
Balanced	Laden mit gleichbleibender Leistung während der gesamten Standzeit
Market	Nutzt Preisinformationen um kostenoptimiert zu laden, mit Greedy oder Balanced Varianten
Schedule	Bezug von Ladeleistung nach Vorgaben des Netzbetreibers als Zeitreihe
FlexWindow	Bezug von Ladeleistung nach Vorgaben des Netzbetreibers als Zeitfenster

SpiceEV bildet ähnliche Ladezeitreihen wie SimBEV ab. Diese sind momentan nicht direkt kompatibel mit TracBEV, können aber durch Anpassen der Spaltennamen und in Kombination mit Metadaten aus SimBEV als Eingangsdaten dienen.

2.5.3 HPC-Tool: Verteilung von Schnellladepunkten

Zur Erzeugung von neuen HPC-Standorten wird ein Python-Tool aus einem Auftragsprojekt des RLI genutzt. Dieses ist nicht öffentlich verfügbar, da im ursprünglichen Projekt vertrauliche Daten genutzt wurden. Daher werden für die Verwendung in TracBEV neue Ergebnisse auf Basis öffentlicher Daten erstellt.

Das Tool errechnet deutschlandweit Potentiale für die Positionierung von Schnellladeinfrastruktur in einem 1x1 km Raster. Einfluss auf das Potential haben Eingangsdaten wie die Bevölkerungsdichte und die Verkehrsleistung. Eine vollständige Aufzählung der verwendeten Daten befindet sich in Abschnitt 3.1.2.

2.5.4 eDisGo: Bestimmung der Netzauslastung

Im Projekt open_eGo [17] wurde das Tool eDisGo [18] entworfen, welches Verteilnetze simuliert und Aussagen zum erforderlichen Netzausbau ermöglicht. Zunächst wird mit dem Tool ding0 [19] ein vereinfachtes Netz erstellt. Auf Basis des Python-Moduls PyPSA [20] werden für das Netz die Leistungsflüsse berechnet und auf Probleme analysiert. Im Anschluss erlaubt eDisGo die automatische Verbesserung des Netzes und Optimierung der Netzsteuerung mit dem Ziel, die Kosten für den Netzausbau zu minimieren. Das Tool wird in dieser Arbeit genutzt, um auf Grund von SimBEV-Ergebnissen und den Ladestandorten aus

TracBEV die Auswirkung vom Ladeinfrastrukturausbau auf einzelne Mittelspannungsnetze bestimmen.

2.6 Daten

Damit das Open Source Tool TracBEV veröffentlicht werden kann, müssen die erforderlichen Eingangsdaten frei verfügbar sein. Nachfolgend werden die Quellen dieser offenen Daten vorgestellt.

2.6.1 Mobilität in Deutschland

Als Datenbasis zum Privatverkehr dient die Verkehrserhebung Mobilität in Deutschland 2017 [21] des Bundesverkehrsministeriums. Hierbei handelt es sich um einen großen Datensatz aus Verkehrsbefragungen. Dieser wird in SimBEV genutzt, um Fahrprofile für einzelne Autos zu erstellen.

Bei den Mobilitätsdaten geben Haushalte Informationen über ihre zurückgelegten Wege an. Darin enthalten sind Parameter, nach denen die Daten gefiltert werden können. Als Transportmittel wird nur der motorisierte Individualverkehr gewählt, bei den Wegen werden nur solche mit angegebenem Wegzweck genutzt. Dies ist relevant für die Bildung der Use Cases. Auch wichtig sind die Start- und Endzeit, der Regionstyp und die Jahreszeit. Aus diesen Werten werden für SimBEV Wahrscheinlichkeiten gebildet, um Fahrten für einzelne Fahrzeuge zu bestimmen.

Es gibt mehrere Möglichkeiten zur Kategorisierung von Regionen. In der Tool Chain wird der „Zusammengefasste Regionalstatische Raumtyp“ (RegioStaR 7) [22] genutzt, der nach insgesamt sieben Regionstypen unterscheidet. Dabei gibt es vier städtische und drei ländliche Typen, die zum Beispiel bei der Verkehrsmittelwahl und den zurückgelegten Strecken [23] voneinander abweichen.

Zusätzlich zu den Mobilitätsdaten gibt es einen Haushaltsdatensatz. Darin sind Fahrzeugarten, Regionstyp und Stellplätze je Haushalt aufgeführt. Aus diesen kann bestimmt werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit es möglich ist, private Ladeinfrastruktur zuhause zu installieren.

2.6.2 Open Street Map

Sämtliche benötigte Datensätze, die aus Kartendaten herausgefiltert werden können, werden von Open Street Map (OSM) [24] bezogen. Dabei handelt es sich um eine freie Quelle geographischer Daten, die von Freiwilligen gepflegt wird.

OSM-Objekte besitzen zusätzlich zu ihren Geokoordinaten eine Reihe von Attributen, die aus je einem Schlüssel und einem zugehörigen Wert bestehen. Über den Schlüssel wird die Art des Objekts gesetzt, der Wert spezifiziert den Typ. Eine Linie mit dem Attribut „highway=motorway“ wird von OSM als Straße interpretiert, spezifisch handelt es sich um eine Autobahn. Über diese Merkmale können OSM-Objekte gefiltert werden.

Tabelle 2.5: OSM-Schlüssel und Werte für genutzte Datensätze

Datensatz	Schlüssel	Werte
Straßen	highway	motorway, trunk, primary, secondary, *-link
Points of Interest	amenity, leisure, shop, tourism	restaurant, hotel, bakery, ...
Flächen für Use Case Work	landuse	industrial, commercial, retail

2.6.3 Zensus 2011

Der Zensus 2011 [25] stellt eine Momentaufnahme der Bevölkerung am 9. Mai 2011 dar. Hierbei wurden auf Basis von vorhandenen Registerdaten und ergänzenden Befragungen Daten zur Bevölkerung und zu Wohngebäuden erhoben. Aus dem Zensus werden sowohl die Bevölkerungsdichte als auch die vorhandenen Gebäude in einem Raster von 100x100m bezogen. Sie dienen als Input für die Verteilung der HPC-Standorte im HPC-Tool und für den Use Case Home in TracBEV.

2.6.4 Verkehrsdaten

Für die Positionierung der HPC-Ladepunkte werden Verkehrsdaten für ganz Deutschland benötigt. Hierbei hat jedes Bundesland eine eigene Vorgehensweise bei der Erhebung und Bereitstellung dieser Daten. Aus dieser unvollständigen Sammlung kann kein deutschlandweiter Datensatz erstellt werden. Als Alternative werden die automatischen Zählstellen [26] der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ausgewertet. Es handelt sich dabei um 2039 Zählstellen, die an Bundesautobahnen und Bundesstraßen installiert sind. Der aktuelle Datensatz ist aus dem Jahr 2020. Da dieses Jahr auf Grund der Pandemie ein geringeres Verkehrsaufkommen [2] aufwies, wird stattdessen auf die Daten aus dem Jahr 2019 [27] zurückgegriffen.

2.6.5 Ladesäulen

In TracBEV sollen in einer Region Ladestandorte verteilt werden. Dabei ist es sinnvoll, zuerst bereits vorhandene Ladepunkte zu nutzen. Die Daten zu Ladesäulen [28] werden von der Bundesnetzagentur bezogen. Dort müssen laut Ladesäulenverordnung [29] alle öffentlich zugänglichen Ladepunkte gemeldet werden. Veröffentlicht werden diese aber nur mit Einwilligung des Betreibers. Im Datensatz fehlen also private Ladepunkte, öffentliche Ladepunkte mit fehlender Einwilligung und jene, die vor Inkrafttreten der Verordnung in Betrieb genommen wurden.

3 Methodik

3.1 Datenaufbereitung

Für die Nutzung in den Simulationstools müssen die Daten aus Abschnitt 2.6 angepasst werden. Dazu werden je nach Datensatz folgende Techniken genutzt:

- fertige Kommandozeilentools
- individuell erstellte Python Skripte
- Python Tools aus anderen Projekten

Die resultierenden Eingangsdaten [30] werden auf Zenodo veröffentlicht und sind damit frei zugänglich.

Sämtliche Geodaten müssen im selben Koordinatenreferenzsystem vorliegen, um vergleichbar zu sein. Dazu wird in diesem Projekt das System EPSG 3035 genutzt, welches eine Darstellung Europas mit einer Genauigkeit von 1m zulässt [31].

3.1.1 Verkehrsdaten

Die für das HPC-Tool benötigten Verkehrsdaten müssen tägliche Verkehrsstärken und geographische Daten enthalten. Ziel hierbei ist es, alle Autobahnen und Bundesstraßen mit den jeweiligen Verkehrszählungen der BASt zu vereinen.

Die nötigen OSM-Daten werden von Geofabrik [32] bezogen. Eine komprimierte OSM-Datei, die alle Kartendaten in Deutschland enthält, ist dort im pbf-Format [33] verfügbar. Dieses Format spart Speicherplatz und ist somit gut für die Bereitstellung großer Datenmengen geeignet. Um mit dieser Datei weiterzuarbeiten, muss sie aber zunächst umgewandelt werden. Hierfür gibt es offene Tools, die im OSM-Wiki zum Download bereitstehen. Das Umwandeln vom Format pbf in ein nutzbares Format findet mit Hilfe von osmconvert [34] statt. Der genutzte Befehl in der Kommandozeile sieht wie folgt aus:

```
osmconvert germany-latest.osm.pbf -o=germany-latest.o5m
```

Die entstehende o5m-Datei kann mit dem Tool osmfilter [35] bearbeitet werden, um nur die notwendigen Daten, in diesem Fall alle größeren Straßen in Deutschland, zu extrahieren. Dies geschieht über den OSM-Tag „highway“.

```
osmfilter germany-latest.osm_01.o5m --keep="highway=primary =primary_link =trunk =trunk_link =secondary =secondary_link =motorway =motorway_link =motorway_junction" >streets_filtered.osm
```

Für das Einlesen in einem Python Skript muss diese gefilterte Datei in das Geopackage-Format umgewandelt werden, das Geodaten tabellarisch darstellt. Hierzu wird die frei nutzbare Software QGIS genutzt. Diese kann OSM-Dateien einlesen und im benötigten Dateiformat exportieren. Nach diesem Schritt erhalten wir ein Geopackage mit folgendem Aufbau:

Tabelle 3.1: Aufbau der gefilterten Straßendaten mit Beispieleinträgen

	name	highway	other_tags
1	None	motorway	„bridge“=>“yes“, ...
2	Musterstraße	primary	„lanes“=>“2“, „maxspeed“=>“70“, „ref“=>“B 200“, ...
3	Beispielplatz	secondary	„bicycle“=>“use_sidepath“, ...

Aus der Spalte other_tags wird der Tag „ref“ ausgelesen. Dabei handelt es sich um die Straßenbezeichnung, z.B. A 7. Über diese Bezeichnung können die Zählstellen den Straßen zugeordnet werden. Als Kennwert wird die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke genutzt. Einige Straßen haben mehrere Zählstellen, während es an anderen keine gibt. Für erstere wird ein Durchschnittswert ausgerechnet, der der gesamten Straße zugeordnet wird. Bei Straßen ohne Verkehrszählung wird davon ausgegangen, dass sie eher im unteren Bereich der Verkehrsstärke liegen. Es wird für die beiden Straßentypen der Mittelwert zwischen der minimal aufgezeichneten Verkehrsstärke sowie dem arithmetischen Mittel aller Aufzeichnungen bestimmt. Dieser neue Wert wird allen Straßen mit fehlenden Daten zugeordnet.

Als Ergebnis (Abbildung 3.1) entsteht ein Geopackage, welches die Geometrien für alle Bundesstraßen und Bundesautobahnen und deren durchschnittliche tägliche Verkehrsstärken enthält.

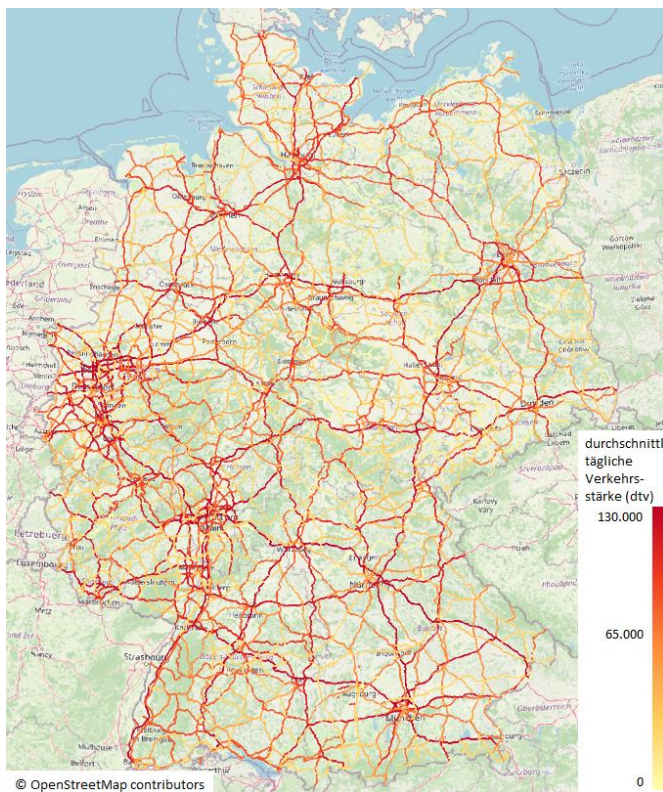


Abbildung 3.1: Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke auf deutschen Bundesstraßen und Autobahnen

3.1.2 HPC Ladepunkte

Als Input für TracBEV soll eine Datei mit HPC-Standorten bereitgestellt werden. Dabei handelt es sich zunächst um gemeldete, tatsächlich existierende Ladesäulen. Diese reichen aber nicht aus, um den Ladebedarf in der Zukunft zu decken. Es müssen also potenzielle Standorte für Schnellladesäulen gefunden werden, die TracBEV zur Verteilung nutzen kann. Dazu wird das HPC-Tool (Abschnitt 2.5.3) verwendet. Dieses wird mit öffentlichen Datensätzen (Tabelle 3.2) gespeist.

Tabelle 3.2: Datensätze für die Bewertung möglicher Schnellladestandorte

Datensatz	Quelle
zugelassene Pkw pro Einwohner	Kraftfahrtbundesamt
Bevölkerungsdichte	Zensus
verfügbares Einkommen	Statistikportal der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder [36]
Anteil der Grünenwähler (Bundestagswahl 2021)	Bundeswahlleiter [37]
touristische Reisegebiete	Statistisches Bundesamt [38]
Verkehrsleistung	erstellt (Abschnitt 3.1.1)
HPC-Standorte	Bundesnetzagentur [28]

Die Potentiale, die bei der Auswahl der Punkte im HPC-Tool erstellt werden, eignen sich nicht, um als Gewichtung in TracBEV übernommen zu werden. Sie werden daher angeglichen, um auf einer Skala von 1 bis 10 dargestellt zu werden. Im Skript `calc_potential.ipynb` (siehe beiliegende Dateien) geschieht dies, indem zunächst die Potentiale neu berechnet werden. Mit Hilfe eines KDTree [39] wird die Distanz zum jeweils nächsten Ladepunkt bestimmt. Diese wird mit einem kombinierten Potentialfaktor multipliziert, den das HPC-Tool aus Bevölkerungsdaten und dem Verkehrsaufkommen erstellt. Anschließend wird von dem entstehenden Gewicht so lange die Wurzel gezogen, bis die Maximal- und Minimalwerte weniger als Faktor 10 auseinanderliegen. Die neuen Potentiale (Abbildung 3.2) werden noch normiert, sodass der Maximalwert bei 10 liegt. Das Ergebnis der Positionierung für die Beispielregion Berlin ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Während bestehende Ladepunkte exakt positioniert sind, liegen die neu generierten Punkte auf einem 1x1 km Raster. Als Standort wird jeweils der Mittelpunkt des Rasterfelds verwendet.

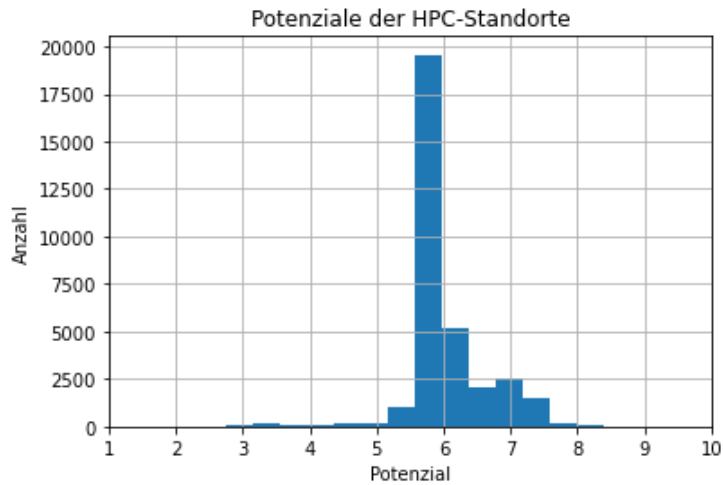


Abbildung 3.2: Normierte Potenziale der HPC-Standorte in der TracBEV-Eingangsdatei

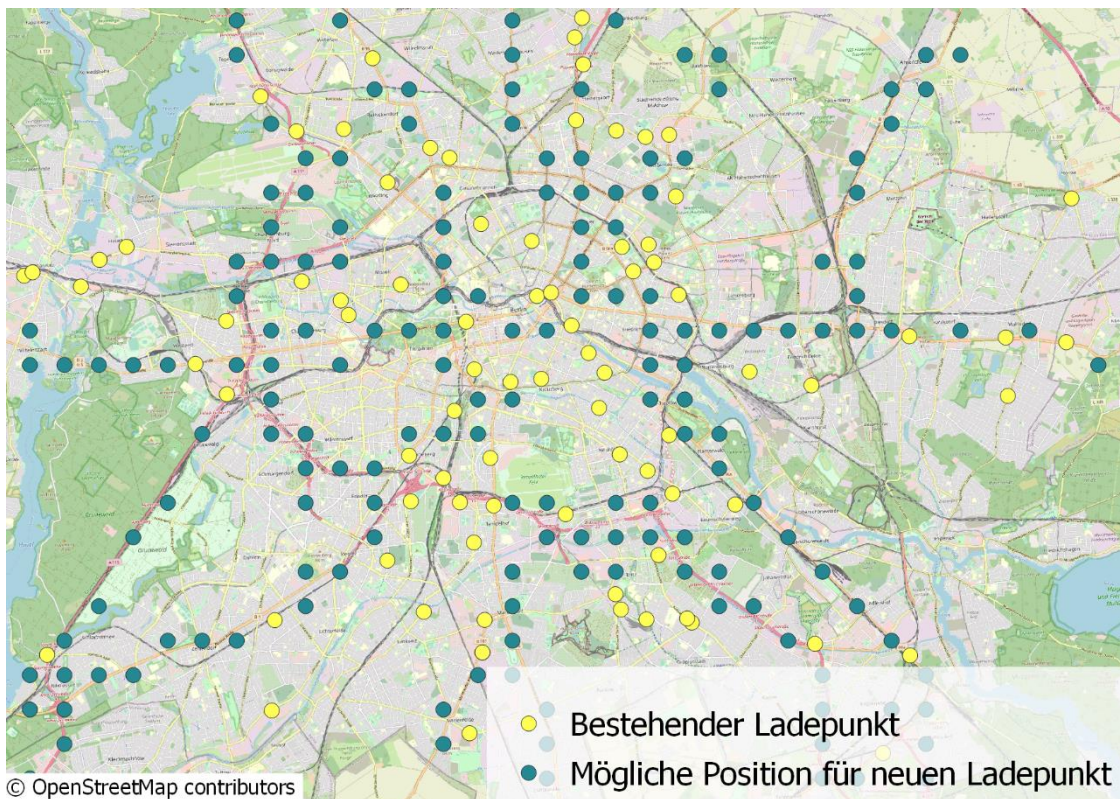


Abbildung 3.3: HPC-Ladepunkte in Berlin

3.1.3 Public Ladepunkte

Aus dem Ladesäulenregister der Bundesnetzagentur werden alle Ladesäulen mit AC-Technik genutzt. Zusammen mit den Geokoordinaten und der Anzahl der Punkte werden diese in einem Geopackage gespeichert.

Neue Ladepunkte sollen in TracBEV anhand von Points of Interest (POI) verteilt werden. Dabei handelt es sich um Orte wie Supermärkte, Parkplätze und Restaurants. Diese Punkte werden nach ihrer Relevanz für die Ladeinfrastruktur gewichtet (Tabelle A.4). Da nicht jeder POI eine eigene Ladesäule benötigt, sollen Punkte in geografische Cluster zusammengefasst werden. Dies geschieht im Skript `preprocess_poi.ipynb`, welches in TracBEV im Ordner „examples“ zu

finden ist. Das Clustering erfolgt nach mehreren Parametern. Allen Punkten wird ein Gewicht zugeordnet und danach absteigend sortiert. Um den Punkt mit höchstem Gewicht wird eine iterativ größer werdende Fläche betrachtet, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist. Als Abbruchkriterium werden ein maximaler Radius der Kreisfläche und ein maximales Flächengewicht angegeben. Das Flächengewicht entspricht der Summe aller Punktgewichte innerhalb des Radius. Effektiv sorgt diese Methodik dafür, dass in Gegenden, die einen hohen Ladebedarf haben, ausreichend Standorte erzeugt werden. Gleichzeitig werden in Gebieten mit weniger POI die Distanzen nicht zu groß.

In Abbildung 3.4 sind alle POI aus OSM sowie die Ergebnisse der Clusterbildung in Berlin-Adlershof zu sehen. An Stellen mit vielen POI liegen die neuen Clusterpunkte recht nah beieinander. Gut zu sehen ist dies in der Mitte der Karte. In den Nebenstraßen sind die Punkte eher weitläufig verteilt. Insgesamt wurde die Anzahl potenzieller Ladepunkte deutlich reduziert, in ganz Deutschland von 3.769.177 POI auf 749.397 Cluster.

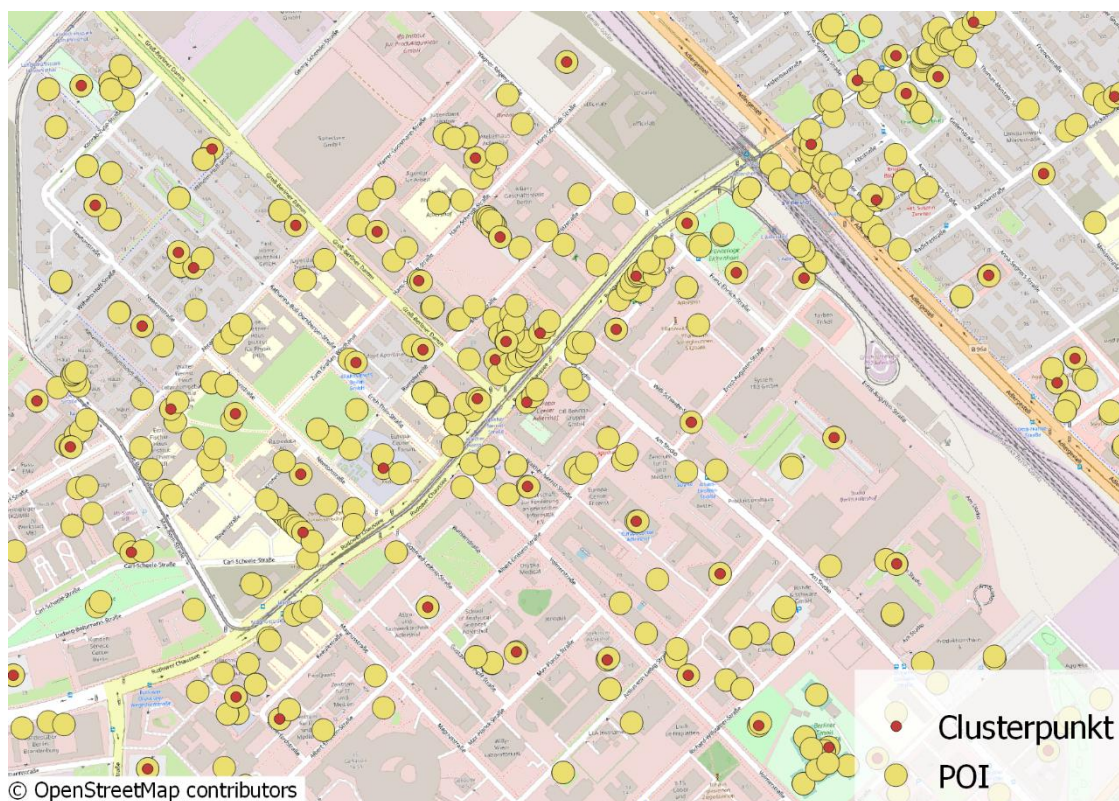


Abbildung 3.4: Ergebnis der Clusterbildung von POI, Berlin-Adlershof

3.2 Anpassung von SimBEV

SimBEV liefert wichtige Daten für die Verteilung von Ladepunkten. Als Vorbereitung auf die Entwicklung von TracBEV musste SimBEV um einige Funktionen erweitert werden.

3.2.1 Ausgabe einer Lastzeitreihe

Ursprünglich hat SimBEV als einzigen Output die Fahrprofile jedes einzelnen Pkw ausgegeben. Diese Outputdateien beinhalten Informationen zu Standzeiten, Fahrtzweck und

Ladeverhalten. Für die Verwendung in TracBEV sollen stattdessen Lastzeitreihen (Tabelle 3.3) der gesamten Region ausgegeben werden. Zu diesem Zweck wurde eine Funktion geschrieben, die einzelne Fahrprofile zu einer Zeitreihe zusammenfasst. Betrachtet werden Füllstand der Batterie, vorhandene Ladepunkte und deren Leistung sowie die Standzeiten der Fahrzeuge. Es wird von einer ungesteuerten Ladestrategie ausgegangen, bei der immer mit maximaler Leistung geladen wird, bis das Fahrzeug wieder abfährt oder der Akku voll beladen ist. In SpiceEV heißt die äquivalente Strategie „greedy“ (siehe Tabelle 2.4).

Tabelle 3.3: Aufbau der Lastzeitreihe in SimBEV

	time	sum cs power	sum hpc	sum public	sum home	sum work
0	08.01.2022 00:00	1586,1	100	1035,1	447,4	3,7
1	08.01.2022 00:15	1454,4	0	970,5	480,2	3,7

3.2.2 Use Case

In SimBEV werden Fahrten nach 7 verschiedenen Wegzwecken unterschieden. Diese sollen auf die 4 Use Cases, die für TracBEV definiert wurden, aufgeteilt werden. Es wurde sich für folgende Implementierung entschieden:

Tabelle 3.4: Aufteilung der Wegzwecke in Use Cases

Use Case	Enthaltene Wegzwecke
HPC	Schnellladeevents in SimBEV
Work	privater Anteil von Work
Home	privater Anteil von Home
Public	restliche Wege

Der privat verladene Anteil von Work und Home wird über einen Parameter in der SimBEV Konfigurationsdatei eingestellt.

3.2.3 Metadaten

Für jede Simulation erstellt SimBEV eine Metadaten-Datei, in der Informationen über die Szenarien und die Simulationseinstellungen gespeichert werden. Diese Metadaten werden erweitert, um alle relevanten Informationen für TracBEV zu sammeln. Zum einen wird die Anzahl der Fahrzeuge, aufgeschlüsselt nach Region und Fahrzeugtyp, zur Datei hinzugefügt. Zum anderen werden die zusätzlichen Parameter aus Abschnitt 3.2.2 abgespeichert.

3.3 Verortungstool TracBEV

Für die Entwicklung von TracBEV stand ein Prototyp zur Verfügung. Dieses vorhandene Verortungstool wird herangezogen, um die Anpassungen in TracBEV zu erklären und um

Ergebnisse der beiden Tools zu vergleichen (Kapitel 4.1). Der Prototyp nutzt die gleichen Use Cases, aber mit unterschiedlicher Methodik. Eine Übersicht ist in Tabelle 3.5 zu finden, genauere Beschreibungen gibt es in den folgenden Abschnitten.

Tabelle 3.5: Methodiken zur Standortauswahl in TracBEV und dem Prototypen

Use Case	Prototyp	TracBEV
Netzverträglichkeit	-	kompatibel mit eDisGo, erlaubt Netzbetrachtung
HPC	Verkehrsaufkommen in einem Radius um Tankstellen	aus Open Data und HPC Tool bestimmt und als Eingangsdaten hinterlegt, Auswahl nach Region und Gewichtung
Public	POI-Liste mit Gewichtung	Kombination der POI, Abfangen anderer Use Cases
Home	Zensusdaten, Einwohner pro Fläche	Regionale Stellplatzverfügbarkeit, Unterscheidung von Haustypen, teilweise Nutzung von Public
Work	Industrial, Commercial, Retail nach Fläche	gleiche Positionierung, teilweise Nutzung von Public

3.3.1 Use Case HPC

Ziel des Use Case HPC ist es, öffentliche Schnellladestationen in einer Region zu verteilen. Diese sind vor allem bei Langstreckenfahrten nötig, um mit geringem Zeitaufwand die Fahrzeugbatterie zu füllen. Daher werden sie an Hauptverkehrsachsen platziert. Die verladene Energiemenge wird aus der Spalte „sum hpc“ der SimBEV Ergebnisse (Tabelle 3.3) entnommen.

Im Prototypen werden Tankstellen als Standorte genutzt. Mit hochaufgelösten Verkehrsdaten wird die Verkehrsleistung in einem Radius um die Tankstelle herum berechnet. Daraus ergibt sich ein Gewicht, über das die verladene Energiemengen proportional bestimmt werden. Mit dieser Implementation gibt es einige Probleme:

- Existierende Ladepunkte werden nicht beachtet
- Alle Tankstellen werden genutzt, solange die Verkehrsstärke größer als 0 ist
- Benötigt hochaufgelöste Verkehrsdaten (Prototyp funktioniert nur für Berlin)

Da schon ein HPC Tool am RLI existiert, werden in TracBEV fertige HPC-Standorte mit Gewichtung (Kapitel 3.1.2) als Eingangsdaten verwendet. Da der Rechenaufwand vorverlagert

wird, läuft der Use Case HPC sehr schnell durch. Die Eingangsdaten liegen als Geopackage vor und sind wie folgt strukturiert:

Tabelle 3.6: Aufbau der TracBEV-Eingangsdaten für den Use Case HPC

	hpc_count	new_hpc_tag	new_hpc_index	potential	geometry
0	2	0	0	7	POINT (4311761,276 2829466,729)
1	1	1	1	8	POINT (4323193,864 2815929,688)
2	1	1	2	5	POINT (4323193,864 2815929,688)

Diese erstellten Standorte werden frei zur Verfügung gestellt. Nutzer können auch eigene Ladepunkte verwenden, indem sie ein Geopackage mit demselben Aufbau wie in Tabelle 3.6 erstellen.

Die Anzahl der benötigten Standorte in einer Region wird über die Spitzenlast bestimmt. In der Eingangsdatei „usecase_params.csv“ können eine durchschnittliche Leistung der Ladesäulen sowie ein Gleichzeitigkeitsfaktor angegeben werden. Die Anzahl der benötigten Ladesäulen berechnet sich dann wie folgt:

$$\text{Anzahl Ladesäulen} = \frac{\text{Spitzenlast}}{\text{durchschnittliche Leistung} * \text{Gleichzeitigkeitsfaktor}}$$

Dabei wird das Ergebnis auf die nächste ganze Zahl aufgerundet.

In Abbildung 3.5 ist der Ablauf der Funktion *hpc* in TracBEV dargestellt. Zunächst werden alle existierenden Ladepunkte verwendet. Wenn die Anzahl der benötigten Ladesäulen größer ist als die bereits installierten, werden zusätzlich neue Punkte verteilt. Dabei beginnt der Algorithmus bei denen mit dem höchsten Gewicht. Wenn mehr Ladepunkte benötigt werden als in den Eingangsdaten vorhanden sind, werden die Energiemengen stattdessen auf die gewählten Standorte verteilt. Dies entspricht in Realität der zusätzlichen Installation von Ladesäulen an den Standorten.

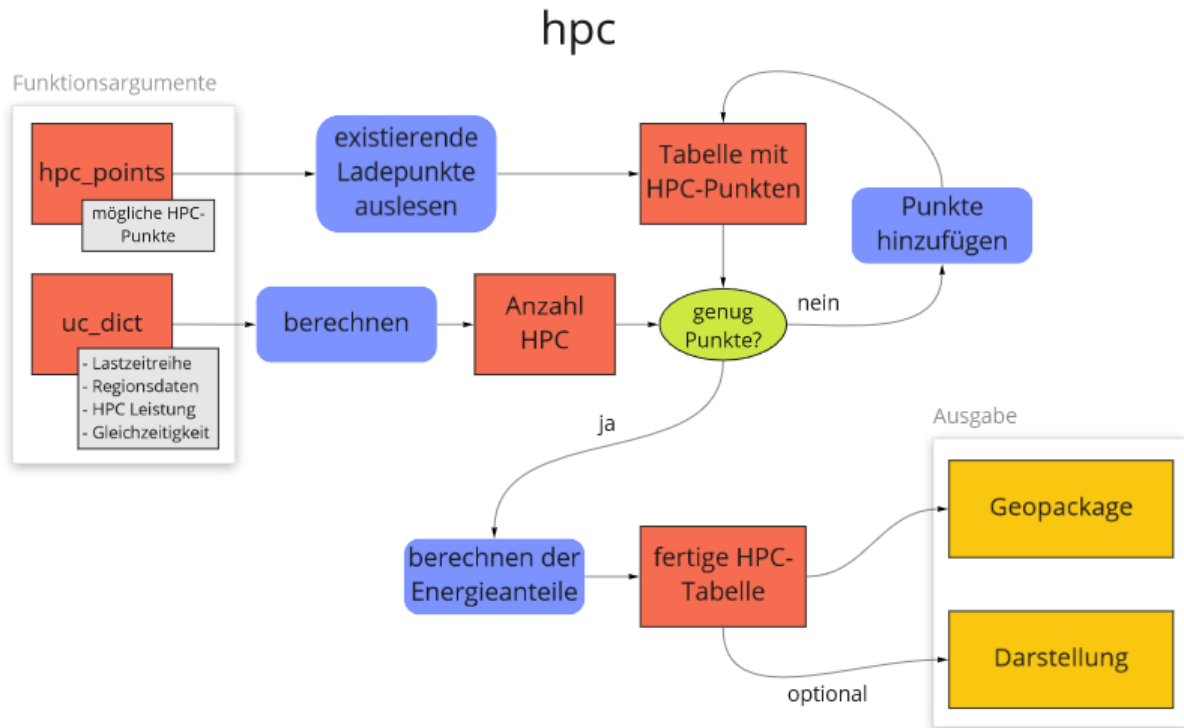


Abbildung 3.5: Ablauf der Funktion *hpc*

3.3.2 Use Case Public

Der Use Case Public befasst sich mit öffentlicher Ladeinfrastruktur, die nicht Teil des Schnellladens ist. Dabei handelt es sich um AC-Ladesäulen mit geringer Leistung. Die verladene Energiemenge wird aus der Spalte „sum public“ aus den SimBEV-Ergebnissen (Tabelle 3.3) abgelesen.

In der ursprünglichen Methodik wurden Energiemengen auf alle Points of Interest (POI) in einer Region verteilt. Dies erfolgte auf Basis einer unvollständigen Gewichtungstabelle. In TracBEV werden die POI in Cluster aufgeteilt und gewichtet (Abschnitt 3.1.3). Die aus der Clusterbildung resultierende Eingangsdatei ist in Tabelle 3.7 dargestellt.

Tabelle 3.7: Aufbau der Clusterpunkte im Use Case Public

	potential	radius	geometry
0	260	20	POINT (4209935,675 2908889,905)
1	50	60	POINT (4375249,274 3258639,081)
2	15	200	POINT (4331769,430 3480372,272)

Der Aufbau der Funktion *public* in Abbildung 3.6 ähnelt dem Ablauf von *hpc*. Dies liegt daran, dass beide Use Cases hauptsächlich im Preprocessing verarbeitet werden. Sie unterscheiden sich etwas, da die POI-Cluster und die vorhandenen Ladesäulen als unterschiedliche

Eingangsdaten vorliegen, die erst beim Durchlaufen der Funktion kombiniert werden. Diese Trennung erlaubt eine leichte Anpassung der existierenden Ladepunkte.

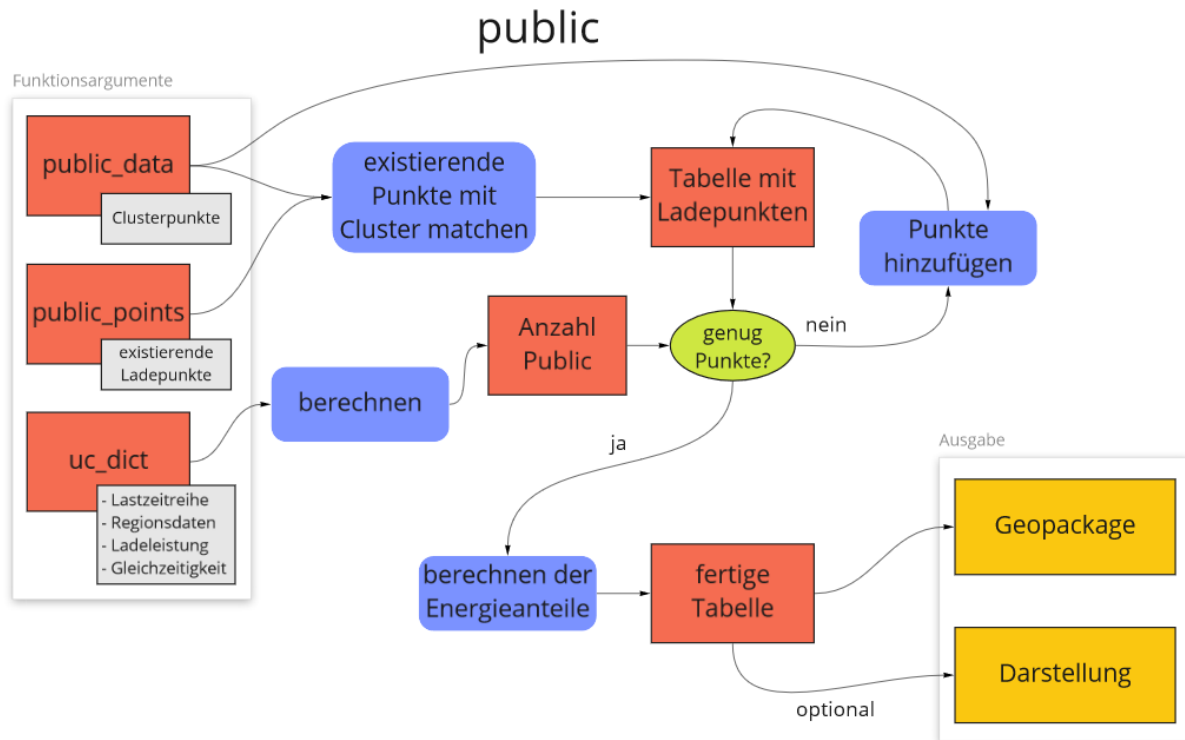


Abbildung 3.6: Ablauf der Funktion public

3.3.3 Use Case Home

Beim Use Case Home werden private Ladestationen am Wohnort betrachtet. Dabei kann es sich um eine einfache Steckdose oder eine Wallbox handeln. Die zugehörige SimBEV-Zeitreihe heißt „sum home“.

In der früheren Version wurde die Energie nach Einwohnerzahlen in einem 100x100 m Raster verteilt. In der gleichen Auflösung sind Zensusdaten zu Gebäudetypen verfügbar. Diese sind in mehrere Kategorien aufgegliedert (Tabelle 3.8). Für die Betrachtung der Stellplatzverfügbarkeit werden die Gebäude in Ein- und Mehrfamilienhäuser eingeteilt. Dabei wird festgelegt, dass die Kategorien 1 bis 6 als Einfamilienhaus gelten. Diese Daten werden mit einem Python Skript in ein Geopackage (Tabelle 3.9) umgewandelt, welches in TracBEV verwendet wird.

Tabelle 3.8: Kodifizierung der Gebäudetypen im Zensus

Code	Bedeutung
1	Freistehendes Einfamilienhaus
2	Einfamilienhaus: Doppelhaushälfte
3	Einfamilienhaus: Reihenhaushaus
4	Freistehendes Zweifamilienhaus
5	Zweifamilienhaus: Doppelhaushälfte
6	Zweifamilienhaus: Reihenhaushaus
7	Mehrfamilienhaus: 3-6 Wohnungen
8	Mehrfamilienhaus: 7-12 Wohnungen
9	Mehrfamilienhaus: 13 und mehr Wohnungen
10	Anderer Gebäudetyp

Tabelle 3.9: Aufbau der Eingangsdaten für den Use Case Home

	population	num	num_mfh	geometry
0	17	6	NaN	POLYGON ((4417700.000 3176100.000, 4417700.000...
1	23	7	3.0	POLYGON ((4413600.000 3096200.000, 4413600.000...

Die Funktion *home* (Abbildung 3.7) betrachtet alle vorhandenen Einfamilienhäuser in der Region. Aus den SimBEV-Daten werden die benötigten Ladepunkte errechnet. Sie ergeben sich aus dem Produkt der Autoanzahl und der Stellplatzverfügbarkeit. Anschließend werden die Ladepunkte auf die Gebäude verteilt.

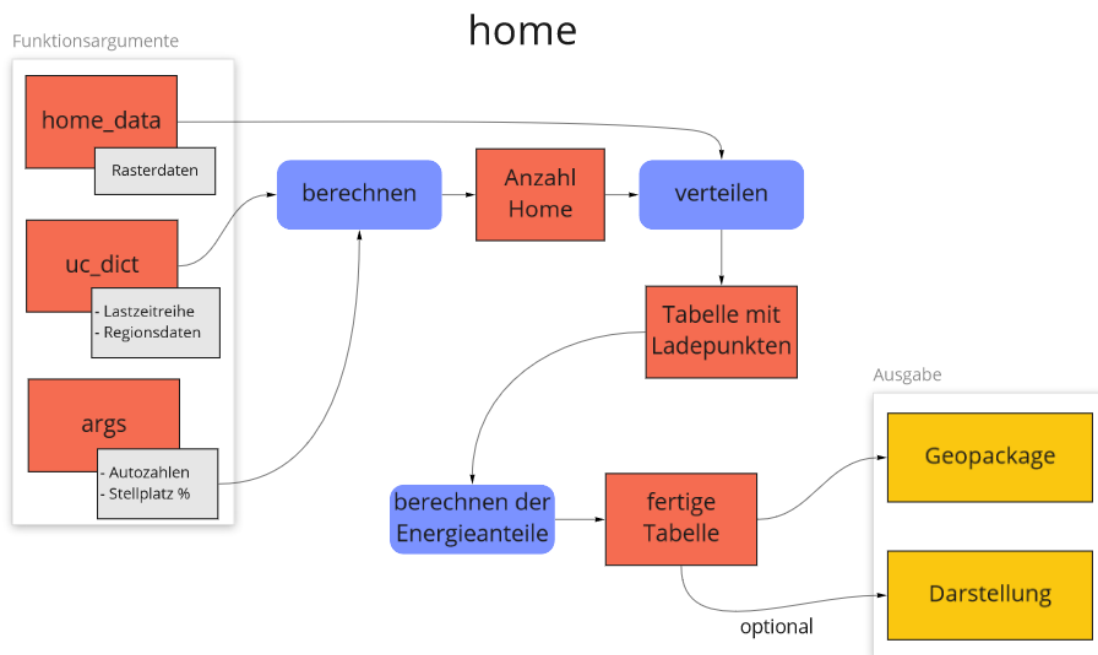


Abbildung 3.7: Ablauf der Funktion home

3.3.4 Use Case Work

Der Use Case Work befasst sich mit privaten Ladestationen, die auf Firmenparkplätzen für die Mitarbeiter zur Verfügung stehen. Die zugehörigen Ladevorgänge werden in SimBEV als „sum work“ zusammengefasst.

Der Prototyp bestimmt über das OSM-Attribut „landuse“, ob ein Gebiet industriell, kommerziell oder für den Einzelhandel genutzt wird. Dann wird abhängig von der Größe der Fläche und einem Gewichtungsparmeter je Flächentyp die Energiemenge aufgeteilt. Dieser Use Case wurde über einen Parameter in SimBEV erweitert, der den Anteil privater Ladevorgänge beim Wegzweck „work“ regelt. Die Funktion *work*, die in Abbildung 3.8 dargestellt ist, unterscheidet sich also kaum von der äquivalenten Funktion im Prototypen.

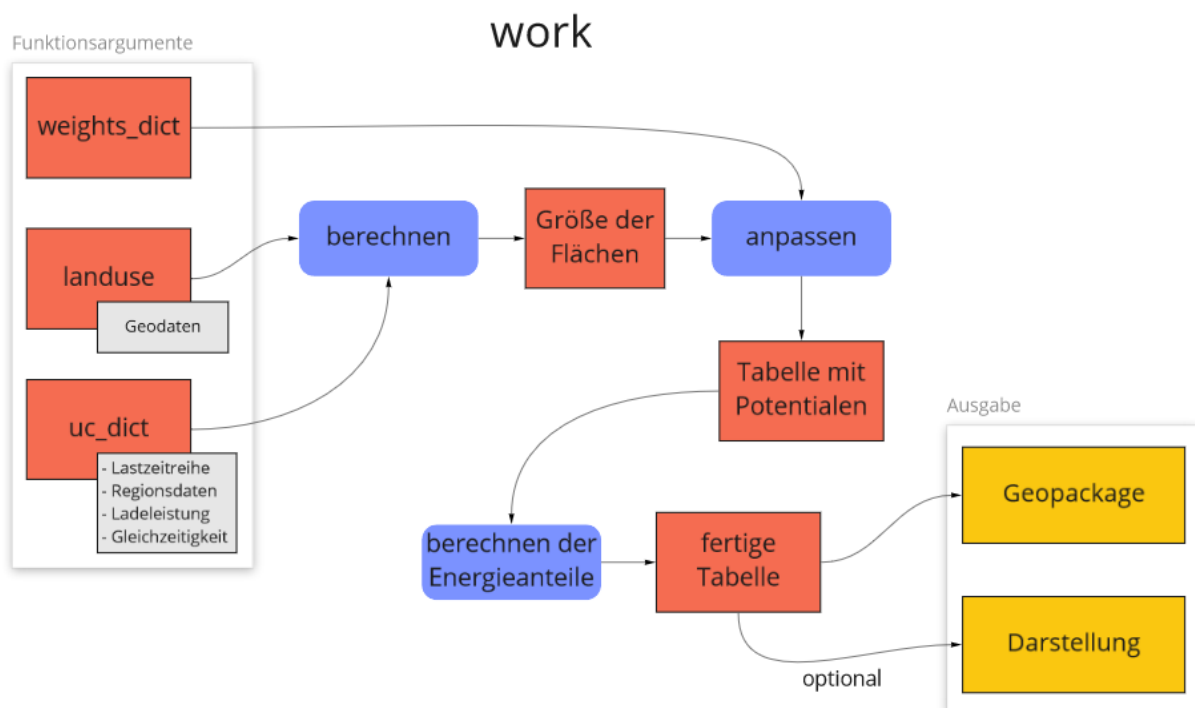


Abbildung 3.8: Ablauf der Funktion *work*

3.3.5 Generelles

Um TracBEV zu nutzen, kann ein neues Szenario angelegt werden oder das Standardszenario genutzt werden. Um ein neues Szenario zu erstellen, sollte der Unterordner „default_scenario“ im Ordner „scenarios“ kopiert werden. Darin sind folgende Dateien enthalten:

Tabelle 3.10: Aufbau eines TracBEV-Szenarios

Datei	Inhalt
TracBEV Konfigurationsdatei	<ul style="list-style-type: none"> - Namen der Eingangsdateien - Use Case Parameter - Use Cases, die zu rechnen sind
SimBEV Zeitreihen	<ul style="list-style-type: none"> - Leistungszeitreihen, aufgeschlüsselt nach Use Case - Regionsschlüssel im Dateinamen
SimBEV Metadaten	<ul style="list-style-type: none"> - Fahrzeuganzahl je Region und Typ - Privatladeanteil für Work und Home

Der grobe Aufbau von TracBEV ist in Abbildung 3.9 zu sehen. Im Skript „main.py“ (Abbildung 3.10) wird zunächst das Szenario eingelesen. Von dort werden je Region die gewünschten Use Cases berechnet. Diese sind als Funktionen in „usecase.py“ hinterlegt. Nach erfolgreicher Simulation sind alle Ergebnisse in einem Unterordner von „results“ zu finden, der nach dem Szenario und dem Zeitstempel des Simulationsstarts benannt ist.

TracBEV

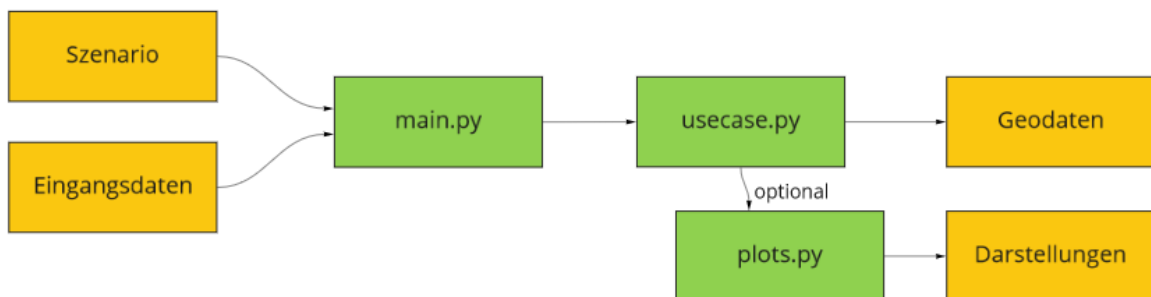


Abbildung 3.9: Grobe Struktur von TracBEV

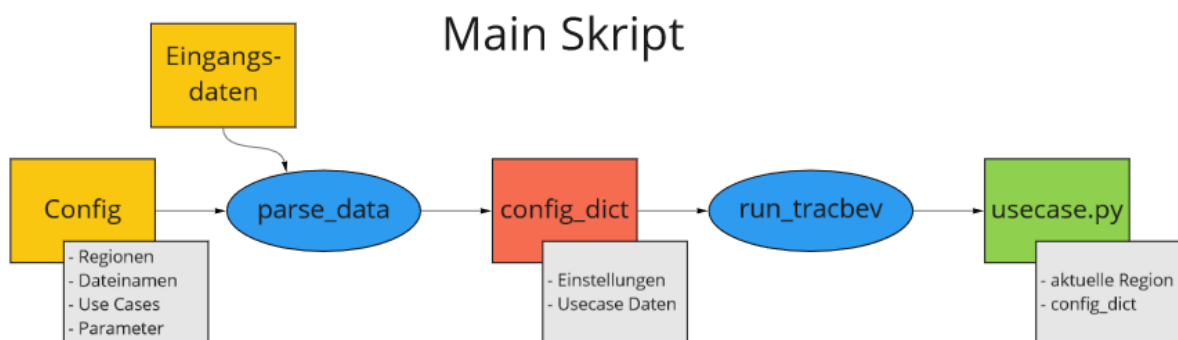


Abbildung 3.10: Aufbau von main.py

Die in Abbildung 3.10 erwähnte Variable „config_dict“ ist vom Typ Dictionary. Darin können Elemente als Schlüssel-Werte-Paare abgespeichert werden. In Tabelle A.1 und Tabelle A.2 sind die gespeicherten Informationen aufgelistet.

3.4 Testszenarios

3.4.1 Szenario Referenznetzgebiete

Für das Testen von TracBEV muss ein Szenario festgelegt werden. Es sollen verschiedene Regionstypen betrachtet werden. Da auch das Netzverhalten untersucht wird, werden Netzgebiete statt Gemeinden oder Städten benutzt. Dabei handelt es sich um Referenznetzgebiete aus der E-Mobility Study [40]. Von diesen werden sechs Stück ausgewählt, die verschiedene Eigenschaften abdecken. Die gewählten Netzgebiete sind in Tabelle 3.11 und Abbildung 3.11 dargestellt. Der Netztyp bezieht sich auf den Energiefluss des Netzes. Erzeugerdominierte Netze können unter den richtigen Bedingungen mehr Strom bereitstellen, als im Netzgebiet verbraucht wird. Für diese Kategorisierung werden Spitzenlasten mit Erzeugungskapazitäten verglichen.

Tabelle 3.11: Eigenschaften der Referenznetzgebiete

Netz ID	Netztyp	Regionstyp (RegioStaR 7)
176	PV-dominiert	ländliche Mittelstadt (76)
177	Last-dominiert	städtische Mittelstadt (73)
1056	PV-dominiert	ländliche Mittelstadt (76)
1690	Wind-dominiert	ländliche Kleinstadt (77)
1811	Wind-dominiert	ländliche Kleinstadt (77)
2534	Last-dominiert	städtische Mittelstadt (73)

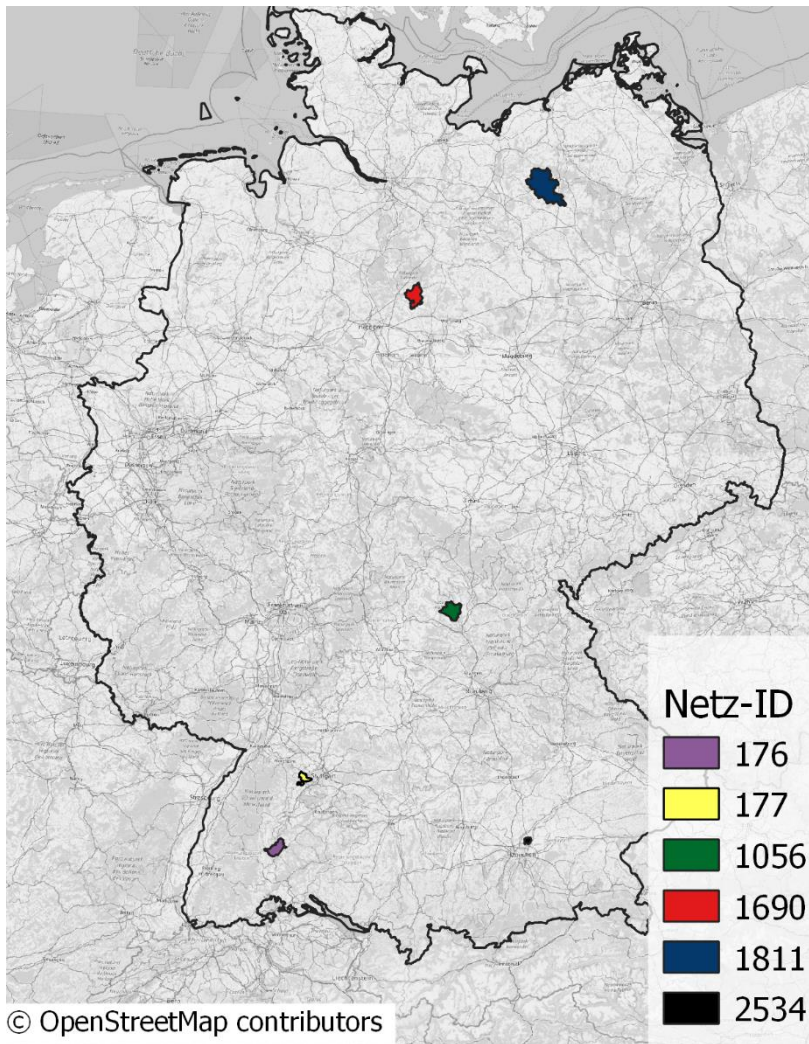


Abbildung 3.11: Lage der Referenznetzgebiete in Deutschland

Als HochlaufszENARIO für die Entwicklung der Elektromobilität wird die Variante C des Netzentwicklungsplans 2035 (NEP C 2035) [41] verwendet. Im Projekt eGon [42] werden auf dieser Basis Hochlaufzahlen pro Region erstellt [43]. Hierzu werden die 14 Millionen E-Pkw des gesamten Szenarios auf die einzelnen Zulassungsbezirke verteilt. Innerhalb eines Zulassungsbezirks werden Einwohnerzahlen aus dem Zensus 2011 verwendet, um ein hoch aufgelöstes Datenset zu erhalten. Diese Rasterfelder werden anschließend wieder zusammengefasst, um Daten für bestimmte Gebiete zu erhalten.

Die oben beschriebenen Hochlaufzahlen wurden für Netzgebiete und für Regionen erstellt. Die Regionen sind nach amtlichem Gemeindegchlüssel (AGS) aufgeteilt, die Netzgebiete sind eine aktualisierte Variante der Referenznetzgebiete, die sich geografisch von den ursprünglichen Netzclustern unterscheiden. Letztere können nicht zur Simulation verwendet werden, da die zugehörigen Netze noch nicht als ding0-Objekte vorliegen. Stattdessen werden die vorhandenen Netzgebiete über AGS-Regionen abgebildet. In Abbildung 3.12 ist beispielhaft das Netzgebiet 1690 in lila dargestellt. Für das dunkel eingefärbte Gebiet sowie für die schwarz umrandeten AGS-Regionen liegen Hochlaufzahlen vor. Das Netzgebiet 1690 deckt genau sechs AGS-Regionen ab, die prognostizierten Autozahlen der Einzelregionen können also aufaddiert werden, um die Werte für das Netz zu erhalten.

Methodik

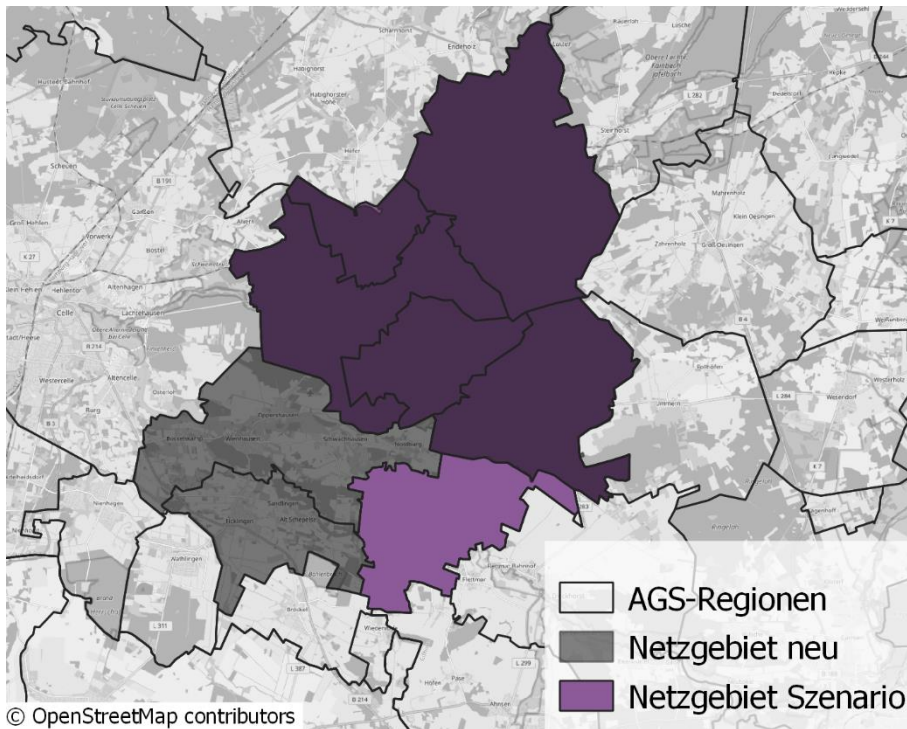


Abbildung 3.12: Netzgebiet 1690 im Vergleich mit AGS-Regionen

Für jedes Netzgebiet wurden so die zugehörigen AGS-Regionen bestimmt. Daraus ergeben sich folgende Hochlaufzahlen:

Tabelle 3.12: Hochlaufzahlen für die Netzregionen nach Szenario NEP C 2035

Regions-ID	BEV			PHEV		
	mini	medium	luxury	mini	medium	luxury
176	1149	2734	828	712	1693	513
177	953	2267	895	591	1404	554
1056	366	1029	264	228	637	163
1690	420	949	290	260	588	179
1811	540	1260	320	333	782	197
2534	398	1285	520	247	796	322

Für die Simulation in SimBEV werden folgende Parameter eingestellt:

Tabelle 3.13: Einstellung für die SimBEV-Simulation im Testszenario

Parameter	Wert
Simulationsdauer	gesamtes Jahr 2022, 15-Minuten Schritte
Privater Anteil Home	35%
Privater Anteil Work	50%
Random Seed	3
Rest	Standardwerte aus Basisszenario default_multi

Um die Netzgebiete in TracBEV darzustellen, muss ein Geopackage mit den Bezeichnungen und den zugehörigen Geometrien erstellt werden. Die Grenzen des Netzgebiets können aus der ding0-Datei „network.csv“ ausgelesen werden, die für jedes Gebiet vorliegt. Die Koordinaten liegen als Längen- und Breitengrade vor und müssen für die Nutzung in TracBEV in das Referenzkoordinatensystem 3035 umgewandelt werden.

Die Simulation des Testszenarios findet in mehreren Schritten statt (Abbildung 3.13). Zunächst werden in SimBEV aufgrund der Hochlaufzahlen die Ladebedarfe je Region erzeugt. An dieser Stelle könnte SpiceEV eingesetzt werden, um verschiedenen Ladestrategien anzuwenden. Die nötige Schnittstelle ist aber zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht fertiggestellt. Die resultierenden Lastzeitreihen, die nach Use Case aufgeteilt sind, werden in TracBEV genutzt, um die Ladepunkte im betrachteten Gebiet zu verteilen. Anschließend werden die erzeugten Punkte sowie die Fahrprofile in eDisGo importiert. Dort wird zunächst der Leistungsfluss des Netzes für die Wochen mit maximaler und minimaler Residuallast ermittelt. Für das errechnete Netzscenario wird noch überprüft, ob Komponenten abgeregelt werden müssen. Darüber kann die Auswirkung der Ladeinfrastruktur auf das Stromnetz bewertet werden.

Tool Chain

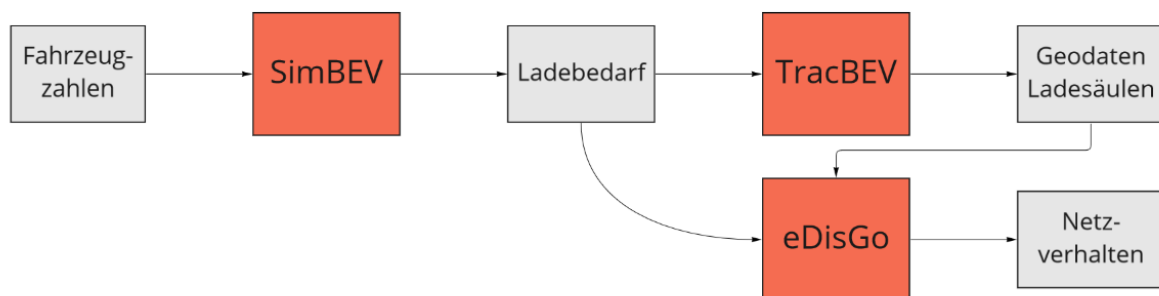


Abbildung 3.13: Aufbau der Toolchain

3.4.2 Szenario Berlin

Als weiteres Szenario wird Berlin mit den Hochlaufzahlen (Tabelle 3.14) des NEP C 2035 [41] simuliert. Ziel ist es, das ursprüngliche Verortungstool mit TracBEV zu vergleichen. Der Prototyp wird so weit angepasst, dass er mit den für dieses Szenario neu berechneten SimBEV-Ergebnissen kompatibel ist. Die Region Berlin wird ausgewählt, da hierfür im Prototypen Verkehrsdaten vorhanden sind.

Tabelle 3.14: Hochlaufzahlen für Berlin im Jahr 2035

AGS	BEV			PHEV		
	mini	medium	luxury	mini	medium	luxury
11000000	60751	119273	38619	37621	73900	23912

Die SimBEV-Einstellungen entsprechen denen aus Tabelle 3.13, es wird allerdings nur eine Januarwoche simuliert. Für die optimale Platzierung der Ladepunkte sollte ein ganzes Jahr simuliert werden, dies führt aber auf Grund der hohen Fahrzeugzahlen zu hohen Simulationszeiten und ist im Rahmen dieser Arbeit nicht umsetzbar. Aus den SimBEV-Zeitreihen werden mit TracBEV und dem Verortungstool Ladestandorte für jeden Use Case erzeugt.

3.4.3 Szenario Frankfurt

Als Validierung des Use Case Home steht ein Datensatz zur Verfügung, der am Fraunhofer IEE im Zuge einer Masterarbeit erstellt wurde [44]. Hierbei wurde auf Basis privater Daten eine hoch aufgelöste Verteilung von privaten Ladepunkten am Wohnort durchgeführt. Es fließen neben Geodaten auch sozioökonomische Kriterien in die Bewertung der Punkte ein. Dieser Datensatz ist nicht öffentlich verfügbar, weshalb in diesem Szenario nur aggregierte Ladesäulen in einem 100x100m Raster betrachtet werden.

Verglichen werden in diesem Szenario die Daten für Frankfurt am Main im Jahr 2035. Dazu wird in SimBEV eine Simulation mit den Hochlaufzahlen aus eGon [42] (Tabelle 3.15) durchgeführt, deren Ergebnisse als Grundlage für die Verteilung mit TracBEV dienen.

Tabelle 3.15: Hochlaufzahlen für Frankfurt am Main im Jahr 2035

AGS	BEV			PHEV		
	mini	medium	luxury	mini	medium	luxury
06412000	13188	37814	12169	8167	23429	7535

4 Auswertung

4.1 Szenario Referenznetzgebiete

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse der Referenznetzgebiete dargestellt und diskutiert. Dabei werden für jeden Use Case Regionen mit unterschiedlichen Ergebnissen ausgewählt. In Abbildung 4.1 ist beispielhaft eine Netzregion mit allen Resultaten zu sehen.

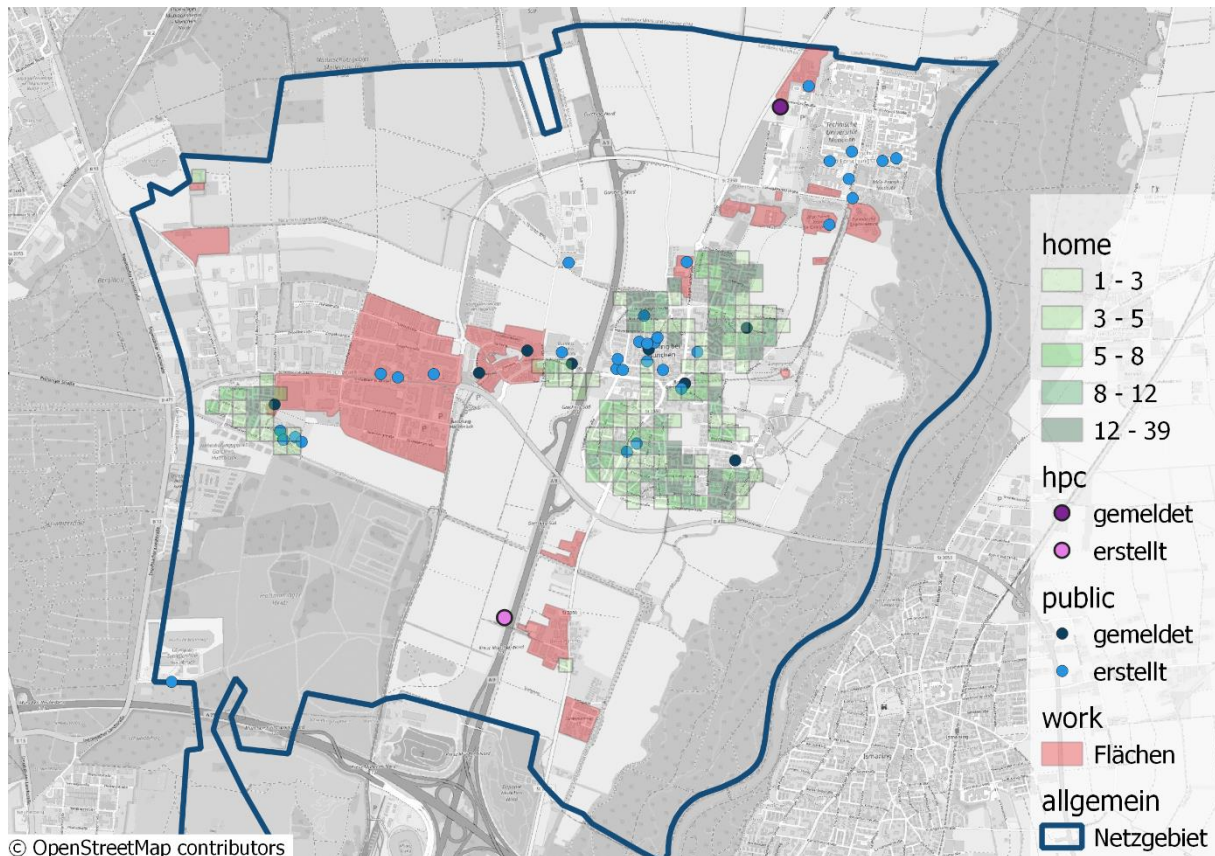


Abbildung 4.1: TracBEV-Ergebnisse für das Netzgebiet 2534

4.1.1 HPC

Im Use Case HPC werden nur wenige Punkte verteilt. Dies liegt zum einen an den groben Eingangsdaten, da das HPC-Tool in einem 1x1km Raster rechnet. Zum anderen hängt der Bedarf an HPC-Ladestationen von der Implementation in SimBEV ab. Dort wird das Schnellladen momentan nur angewandt, wenn keine andere Möglichkeit zum Laden des Fahrzeugs besteht. Ein Hauptnutzen von HPC-Parks, das geplante Laden an Autobahnen auf Langstreckenfahrten, wird hier also nicht betrachtet.

In der Netzregion 177 (Abbildung 4.2) gibt es ein ausgewogenes Ergebnis. Zwei Ladepunkte waren dort schon gemeldet und der Bedarf ist hoch genug, um zwei weitere zu platzieren. Bei den neu erstellten Punkten ist klar zu erkennen, dass sie auf einem Raster liegen. Außerdem befinden sie sich beide in der Nähe einer Bundesstraße, die an einem Ort vorbeiführt.

In der Region 176 (Abbildung 4.3) sind genug Punkte vorhanden, das Tool sieht hier keine zusätzlichen Stationen vor.

Auswertung

Region 1690 (Abbildung 4.4) wird nicht durch die Eingangsdaten abgedeckt. Es gibt dort weder Bundesstraßen noch Autobahnen, und auch keine gemeldeten Ladesäulen. Dabei handelt es sich bei allen Use Cases und Testregionen um den einzigen Fall, wo das Tool zu keinem Ergebnis gekommen ist. In der Weiterverarbeitung in eDisGo wird der Schnellladebedarf in dieser Region über den Use Case Public gedeckt.

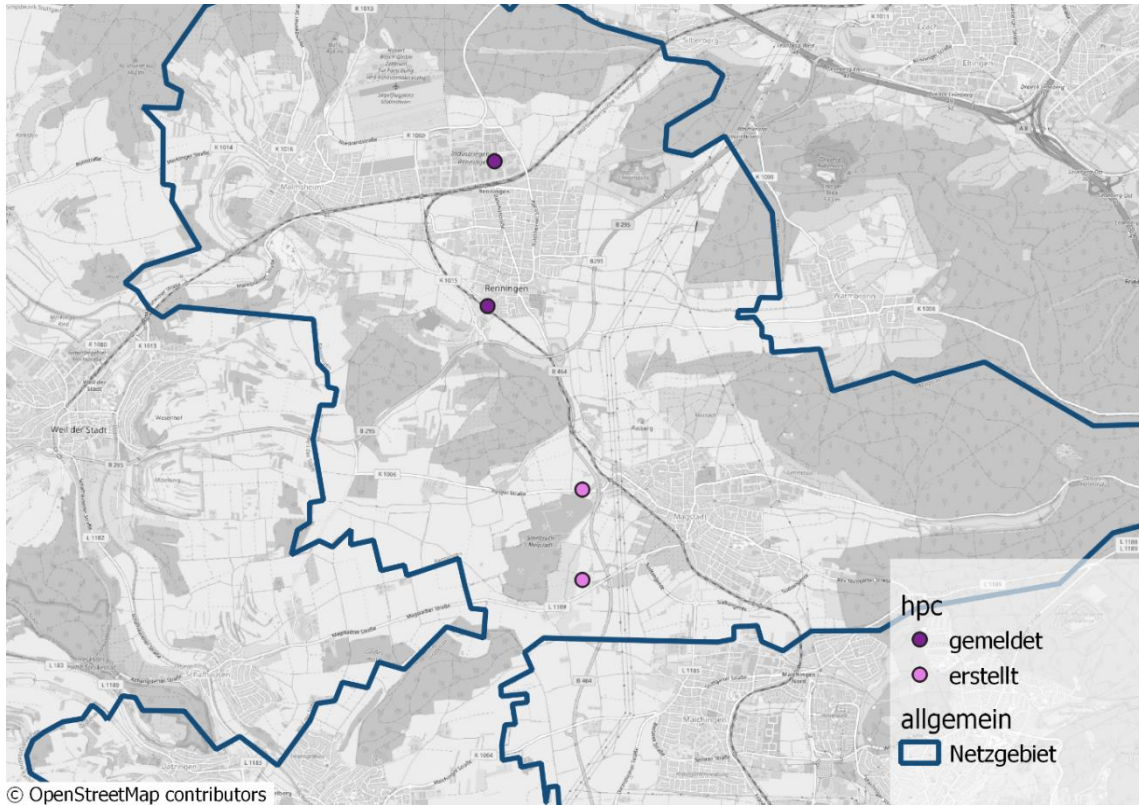


Abbildung 4.2: HPC-Standorte in der Netzregion 177

Auswertung

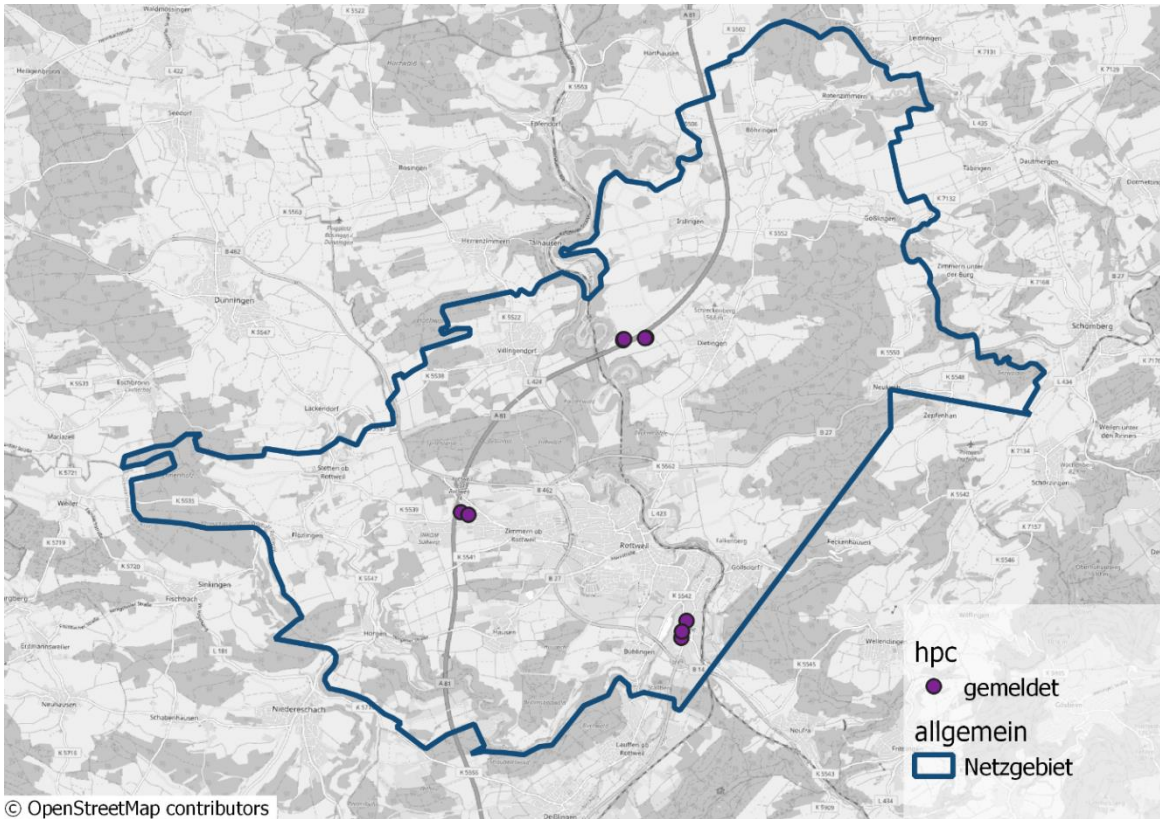


Abbildung 4.3: HPC-Standorte in der Netzregion 176

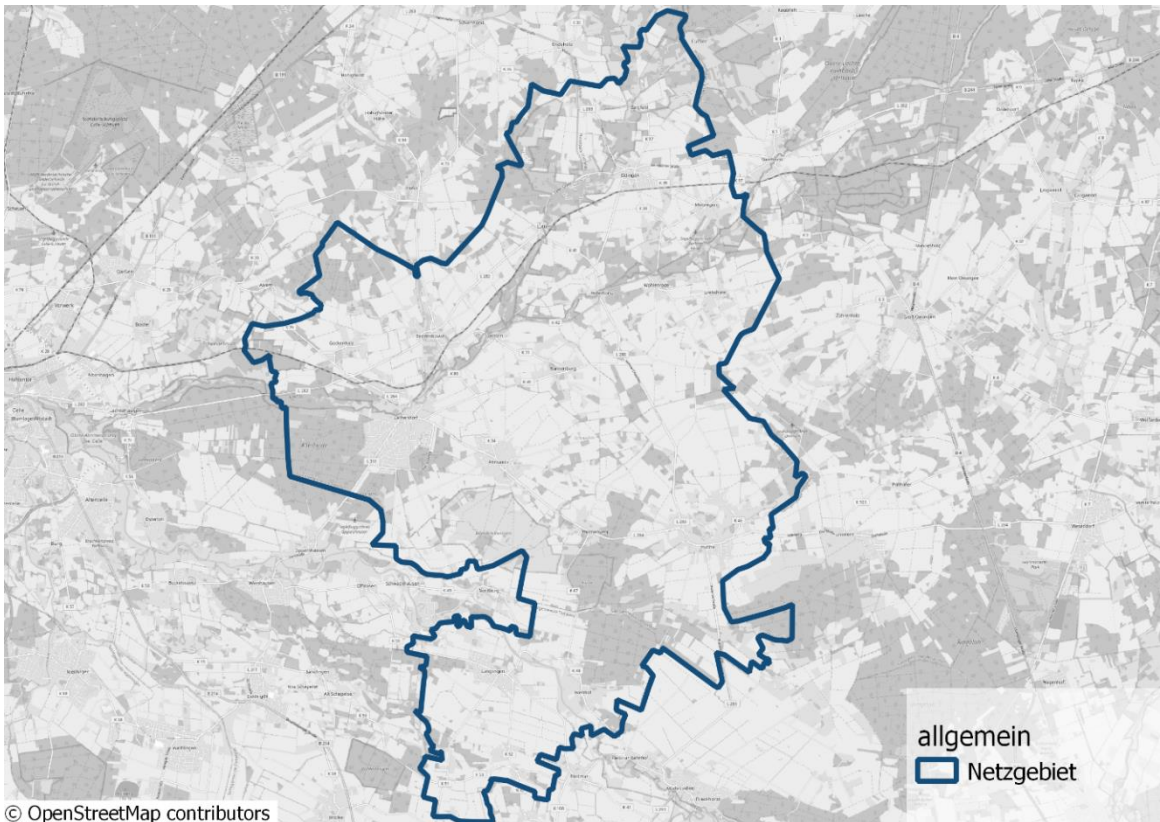


Abbildung 4.4: HPC-Standorte in der Netzregion 1690

4.1.2 Public

Ziel des Use Case Public ist die Verteilung öffentlicher Ladeinfrastruktur an Orten, wo Fahrzeuge längere Zeit stehen können. Sie werden zum großen Teil innerhalb von Ortschaften und Städten platziert. In der Netzregion 177 (Abbildung 4.5) führt dies zu Anhäufungen von Ladepunkten in bewohnten Gebieten. Es liegen auch Daten zu bereits errichteten Ladepunkten vor, der Ausbau hinkt dem Bedarf aber stark hinterher.

In ländlichen Regionen (Abbildung 4.6) führt die TracBEV-Methodik zu vielen einzeln verteilten Ladestandorten. Abgesehen von kleinen Ortschaften kann es sich bei den abgelegenen Punkten auch um Parkplätze oder andere Points of Interest handeln.

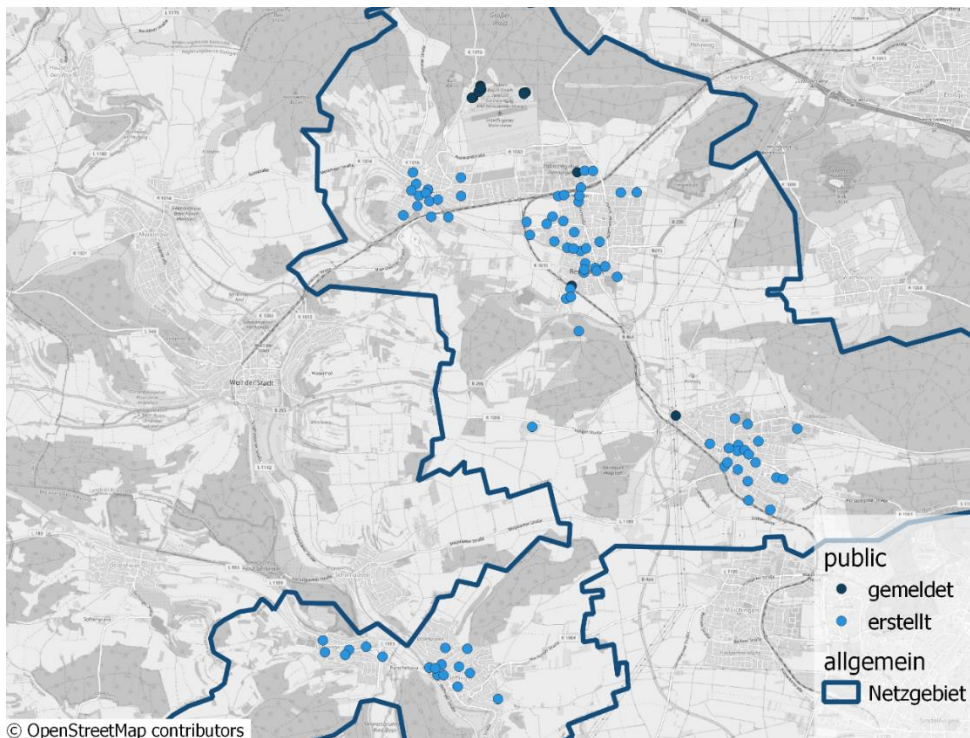


Abbildung 4.5: TracBEV-Ergebnisse für den Use Case Public in Region 177

Auswertung

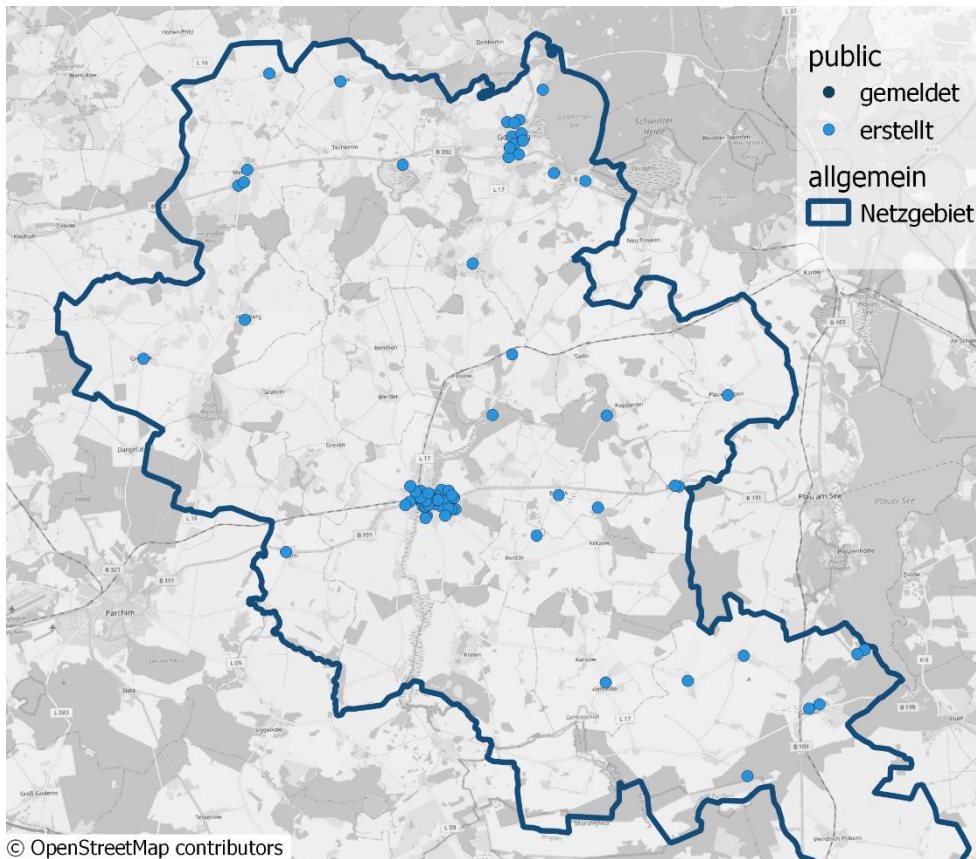


Abbildung 4.6: TracBEV-Ergebnisse für den Use Case Public in Region 1811

4.1.3 Home

Der Use Case Home spiegelt in ländlichen Regionen (Abbildung 4.7) direkt die Position von Ortschaften und Städten wider. Da die Eingangsdaten nur als 100x100m Raster vorliegen, erfolgt die Verteilung der Ladepunkte mit der gleichen Genauigkeit. Je dunkler ein Gebiet eingefärbt ist, desto mehr Ladepunkte sind dort vorgesehen.

In Abbildung 4.8 sind die ausgewählten Standorte in einer Ortschaft zu sehen. Dass nicht jedes Gebäude einen privaten Ladeanschluss besitzt, ist zunächst nicht weiter verwunderlich. Der Bedarf im Szenario ist nicht hoch genug, dass alle Stellplätze benötigt werden. Außerdem werden nur Einfamilienhäuser betrachtet, es könnte sich also bei den nicht gewählten Gebäuden um andere Typen handeln. Bei Betrachtung der Eingangsdaten (Abbildung 4.9) ist allerdings zu erkennen, dass die Zensusdaten zu Gebäuden nicht vollständig sind. Es sind alle Rasterfelder mit Ein- oder Mehrfamilienhäusern sowie alle vorhandenen Einwohnerdaten abgebildet. Für 18 der Felder liegen beide Informationen vor, bei 15 Stück gibt es nur Einwohnerzahlen. Durch diese unvollständigen Eingangsdaten gehen mit der aktuellen Methodik also viele mögliche Ladestandorte verloren.

Auswertung

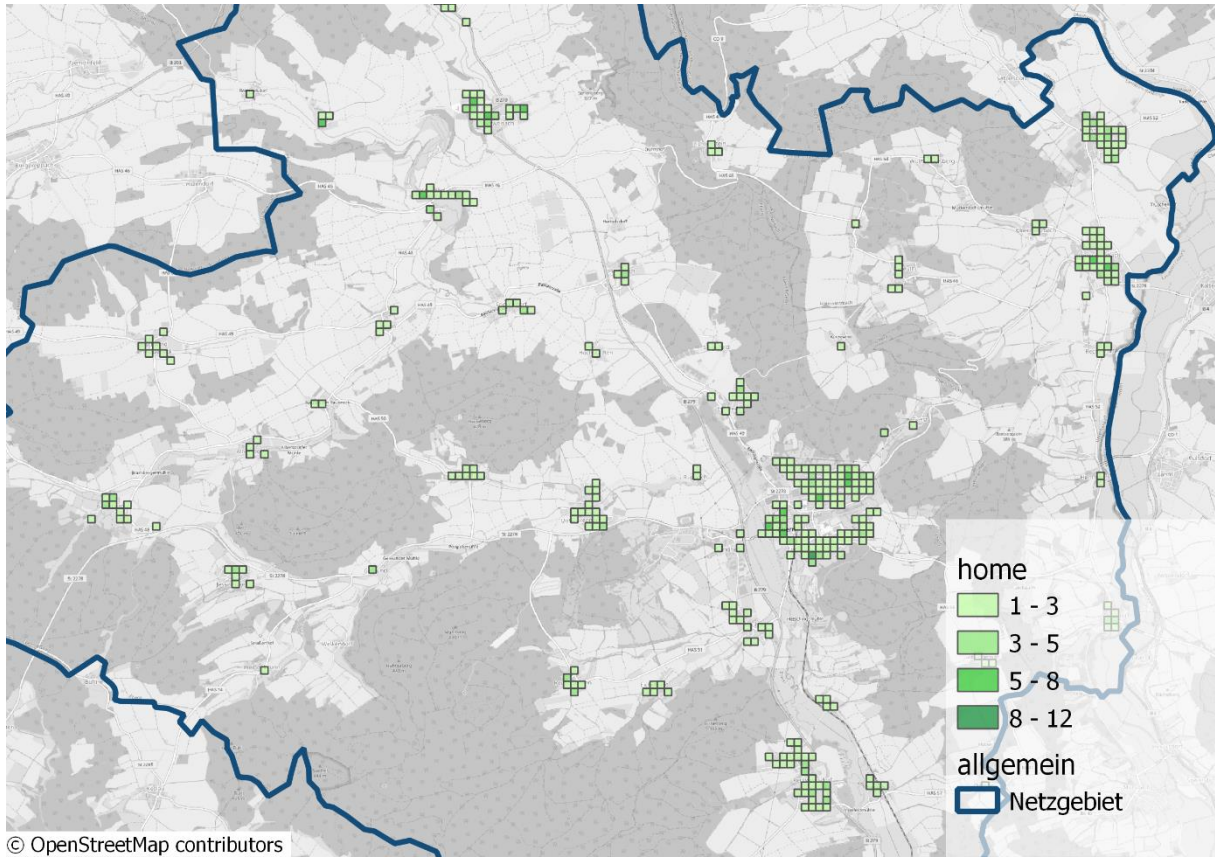


Abbildung 4.7: TracBEV-Ergebnisse für den Use Case Home in Region 1056

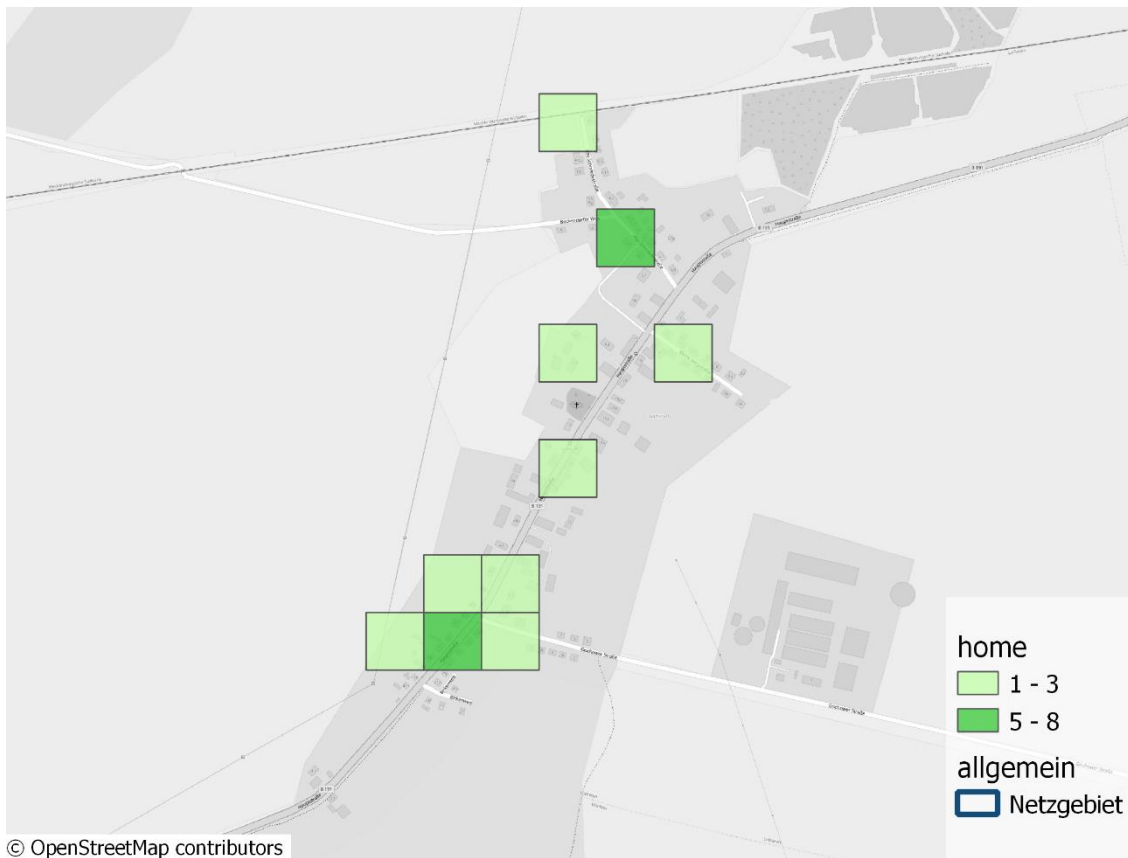


Abbildung 4.8: Ladestandorte einer Ortschaft im Use Case Home

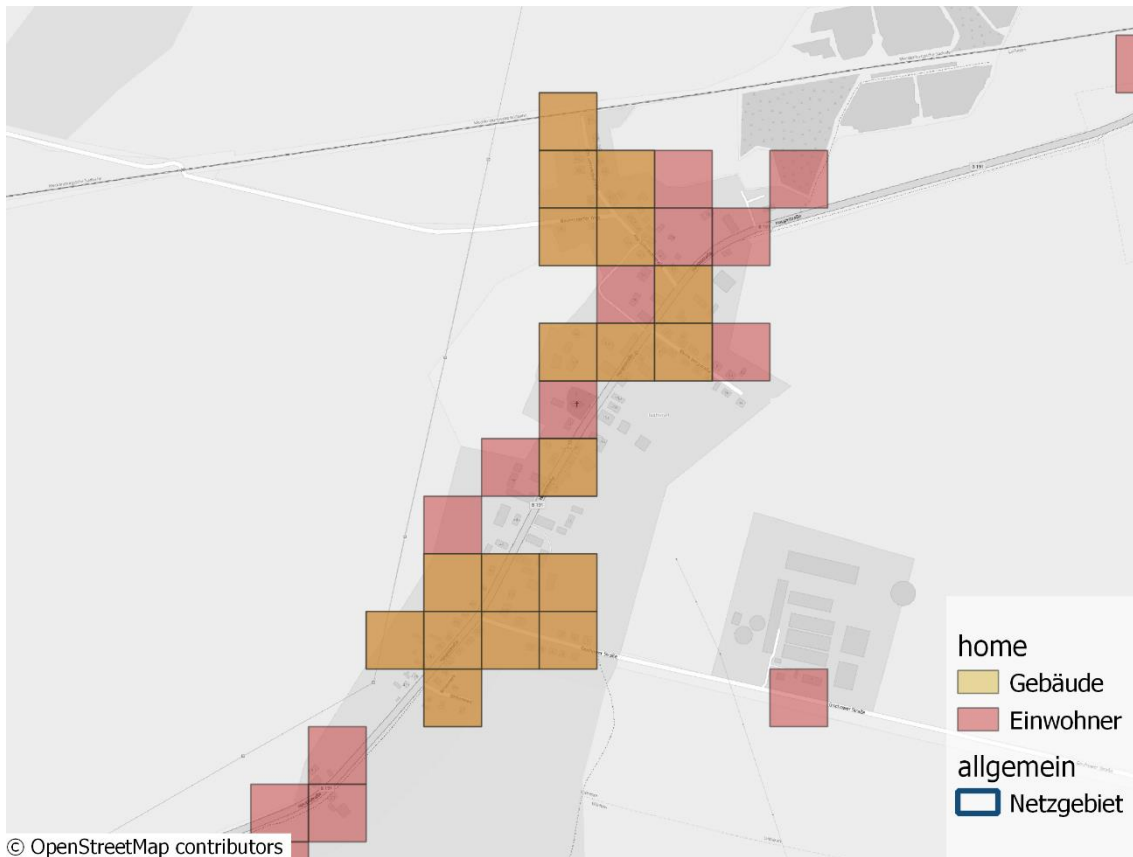


Abbildung 4.9: Eingangsdaten einer Ortschaft für den Use Case Home

4.1.4 Work

Der Use Case Work unterscheidet sich stark je nach Region. In Abbildung 4.10 ist eine landwirtschaftliche Fläche zu sehen, die den OSM-Tag „industrial“ enthält. Diese ist aber weniger geeignet für den Aufbau von Ladeinfrastruktur für Mitarbeiter als ein dicht bebautes Industriegebiet. In Region 2534 (Abbildung 4.11) liegt für den Use Case ein großer Flächenanteil vor. In ländlichen Gegenden (Abbildung 4.12) kommen diese Flächen nur selten vor und fallen häufig kleiner aus. Der Use Case Work bezieht sich hauptsächlich auf Pendler, die für ihren Arbeitsweg auf einen Pkw angewiesen sind. SimBEV und TracBEV gehen allerdings davon aus, dass alle Use Cases, die innerhalb einer Region entstehen, auch in dieser Region bedient werden. Gerade für den Arbeitsplatz wäre es aber sinnvoller, benachbarte Regionen mit einzubeziehen.

Auswertung



Abbildung 4.10: Landwirtschaftliche Flächen im Use Case Work

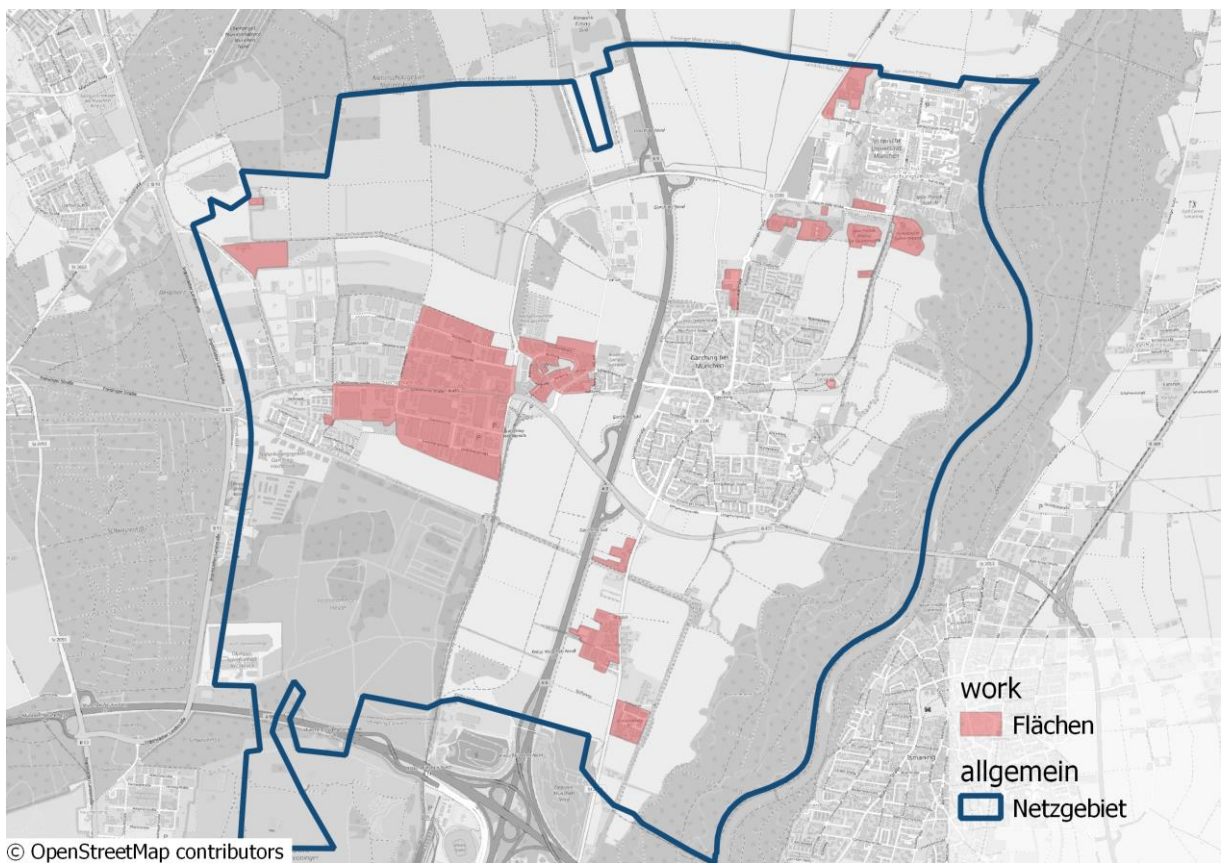


Abbildung 4.11: TracBEV-Ergebnisse für den Use Case Work in Region 2534

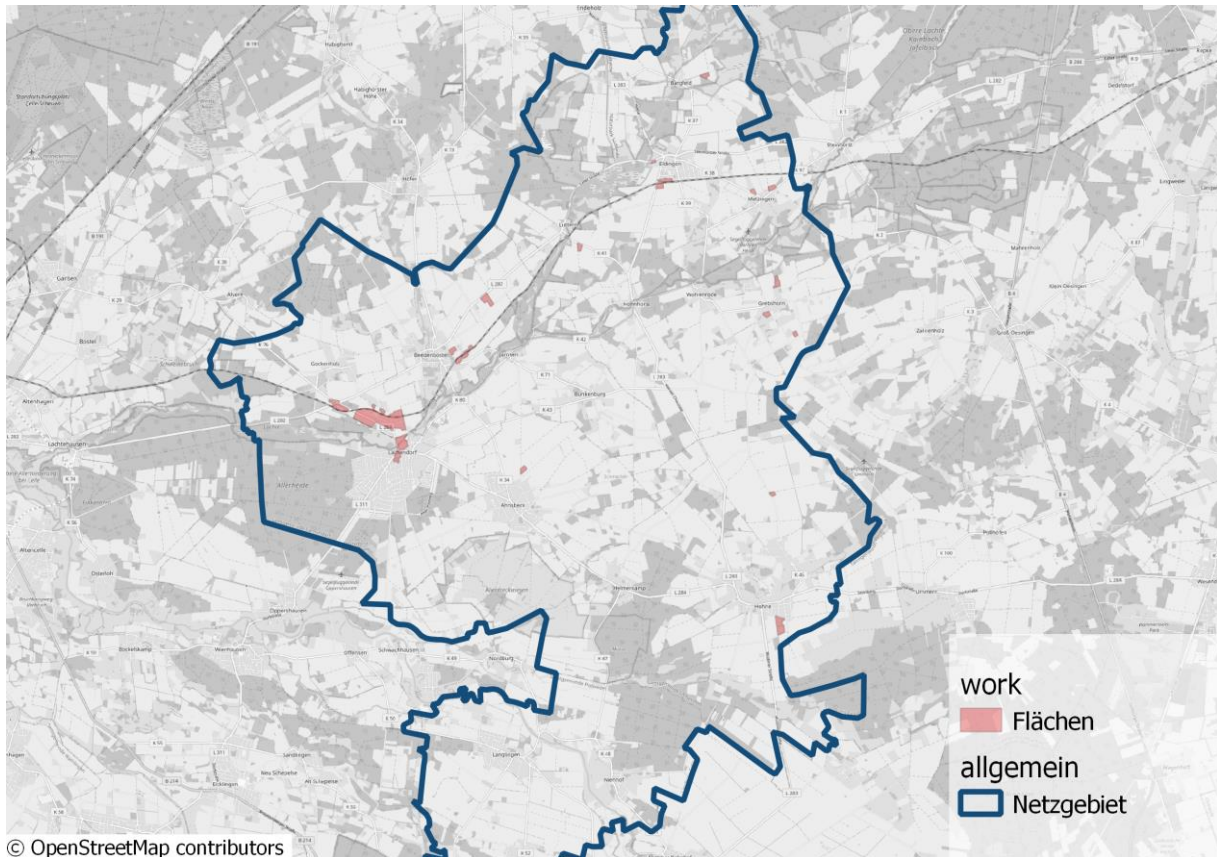


Abbildung 4.12: TracBEV-Ergebnisse für den Use Case Work in Region 1690

4.1.5 Netzverfügbarkeit

Der Netzanschluss ist ein wichtiger Parameter bei der Planung und Installation von Ladepunkten. In diesem Kapitel wird die Position von möglicher Ladeinfrastruktur und den vorhandenen Netzdaten verglichen, um abzuschätzen inwieweit die TracBEV-Ergebnisse zum Netzaufbau passen. Für die Betrachtung der Netzverfügbarkeit werden Geodaten aus dem `ding0`-Objekt des Netzes herangezogen. Darin liegen Koordinaten für das Bussystem vor, welches als Verknüpfung und Anschlusspunkt für die einzelnen Netzkomponenten fungiert.

In der ländlichen Region 1056 sind gemäß Abbildung 4.13 sowohl die Ladepunkte als auch das Mittelspannungsnetz in den Ortschaften konzentriert. Die Use Cases Home und HPC sind komplett gedeckt. Beim Use Case Work gibt es in der Mitte der Region ein paar landwirtschaftliche Flächen, an denen kein Anschluss vorhanden ist. Diese Flächen sind in den Eingangsdaten als „industrial“ gekennzeichnet und werden somit für das Laden an der Arbeitsstelle in Betracht gezogen. Tatsächlich gibt es an Feldern kaum Infrastruktur, die Installation von Ladepunkten für Pkw scheint wenig sinnvoll. Auch beim Use Case Public liegen einige problematische Standorte vor. Dabei handelt es sich ausschließlich um Parkplätze, die außerhalb von Ortschaften liegen. Die Parkplätze werden vermutlich genutzt, um von dort aus spazieren oder wandern zu gehen. Unter dieser Annahme ergeben sich für die Fahrzeuge Standzeiten von mehreren Stunden, die sinnvoll zum Laden genutzt werden könnten. Für die Installation von Ladestationen muss aber ein Netzanschluss hergestellt oder eine geeignete Inselnetzlösung gefunden werden.

Auswertung

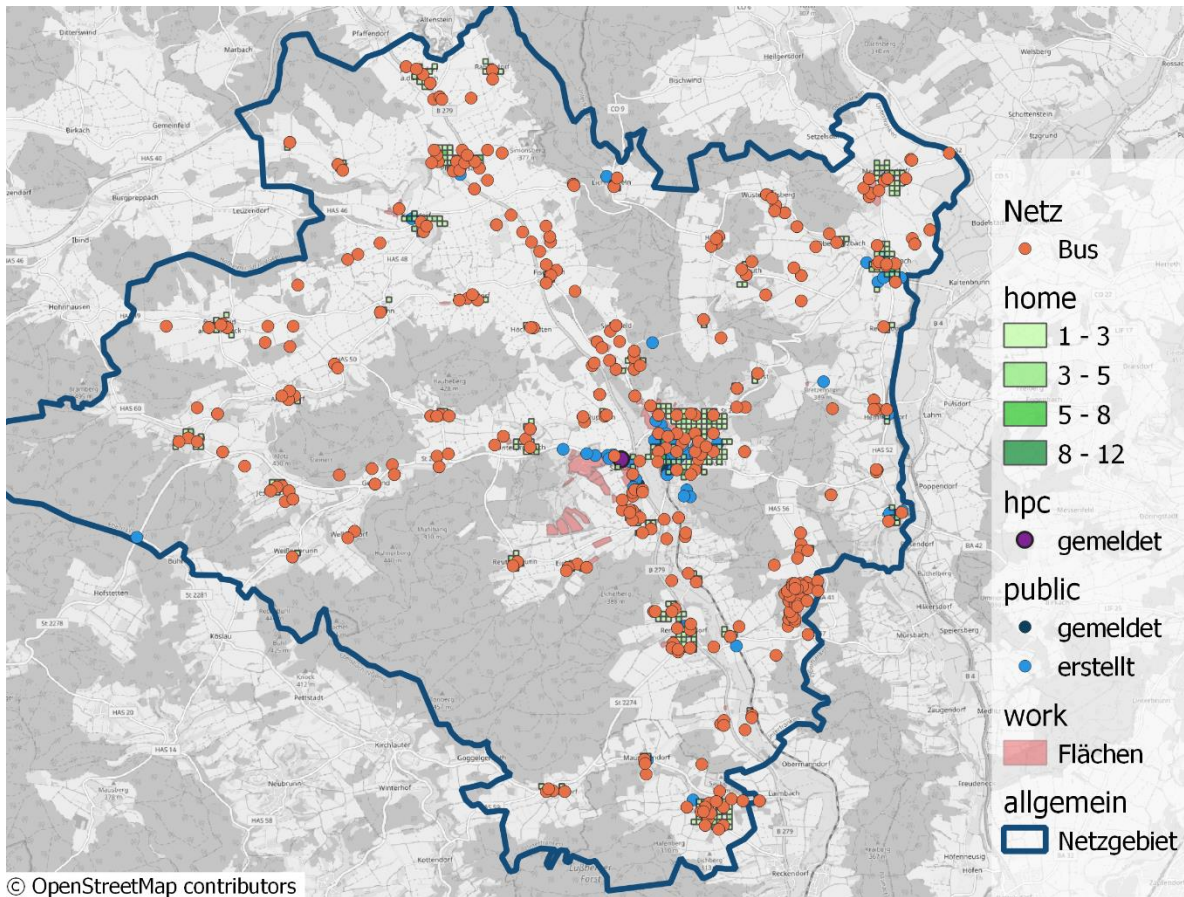


Abbildung 4.13: Netzverfügbarkeit in Region 1056

Als Kontrast zum ländlichen Gebiet ist in Abbildung 4.14 die städtische Region 2534 dargestellt. Auch hier überlappt sich das Netz sehr gut mit den Positionen der Ladeinfrastruktur. Nur der erstellte HPC-Punkt ist nicht in unmittelbarer Nähe eines Buses. Da die HPC-Punkte aber mit einer Genauigkeit von einem Kilometer platziert werden, ist dies nicht weiter verwunderlich. In Realität würde dieser Schnellladepunkt in der Nähe einer Autobahnausfahrt geplant werden, zum Beispiel in der großen Fläche des Use Case Work.

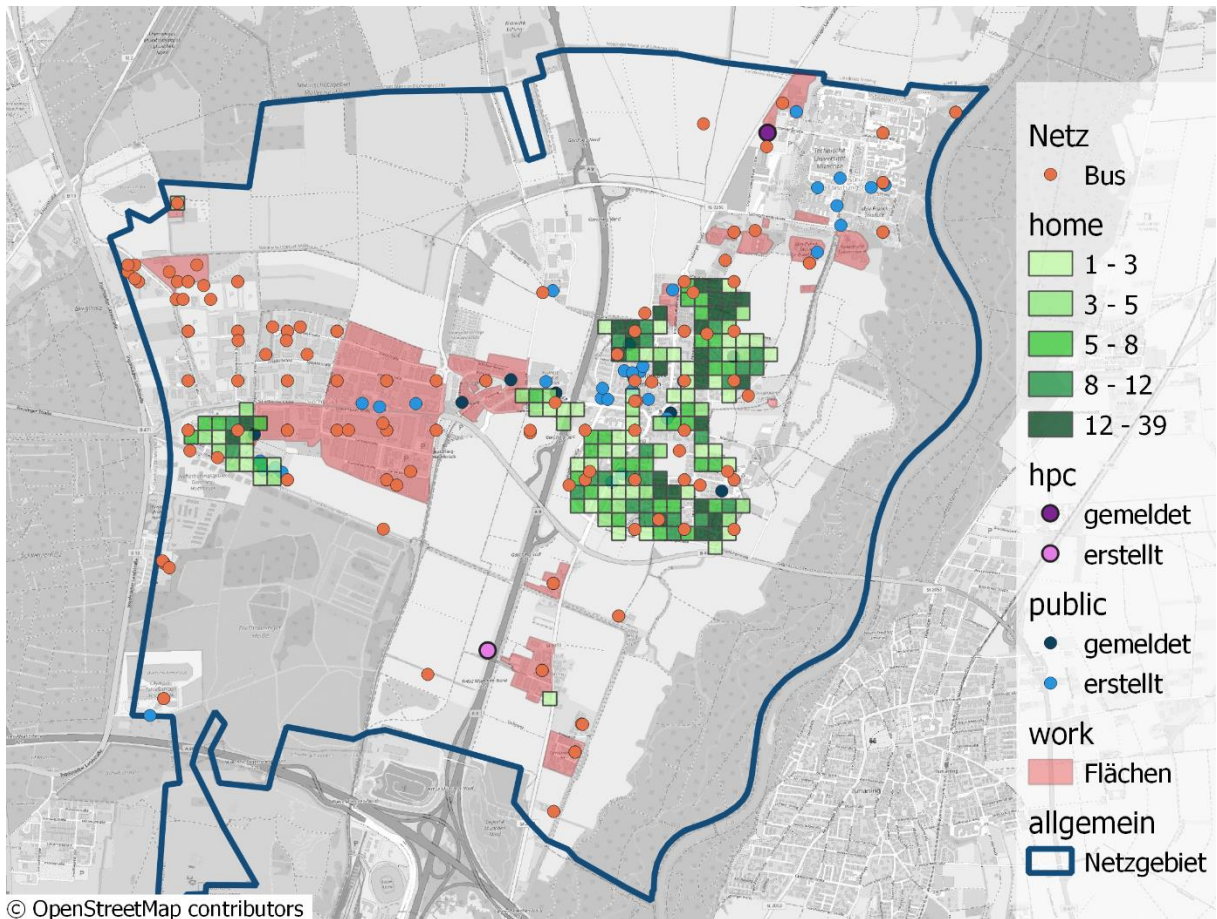


Abbildung 4.14: Netzverfügbarkeit in Region 2534

4.1.6 Netzverträglichkeit

Die Ergebnisse einer Netzsimulation mit eDisGo werden beispielhaft an der PV-geprägten Region 176 gezeigt. Betrachtet werden die Wochen mit minimaler und maximaler Residuallast. In Abbildung 4.15 und Abbildung 4.16 sind die Lastbeträge im Netz dargestellt. Generell ist zu erkennen, dass der Ladebedarf größtenteils tagsüber entsteht und somit gut über PV-Strom gedeckt werden kann. In Tabelle 4.1 ist der Abregelungsbedarf aufgelistet. In der Woche mit minimaler Residuallast ist eine lastseitige Abregelung nötig. Bei maximaler Residuallast hingegen müssen Photovoltaikanlagen häufig auf die Netzeinspeisung mit voller Leistung verzichten.

Auswertung

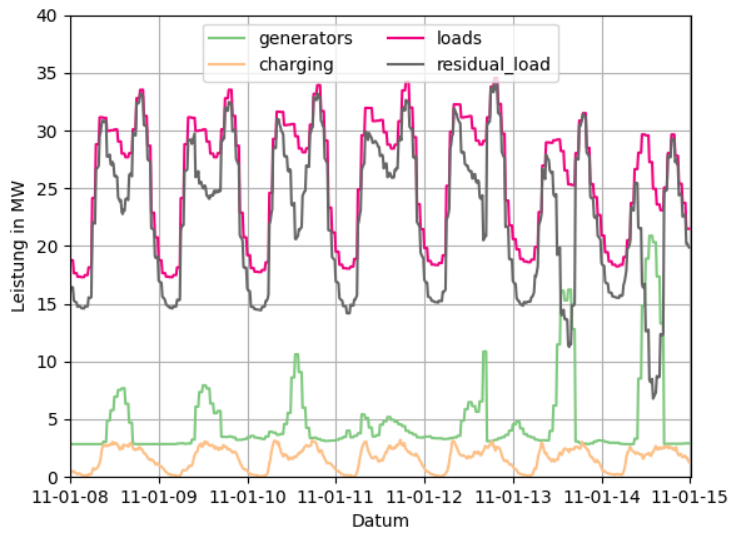


Abbildung 4.15: Leistungsfluss in der Woche mit maximaler Residuallast in Region 176

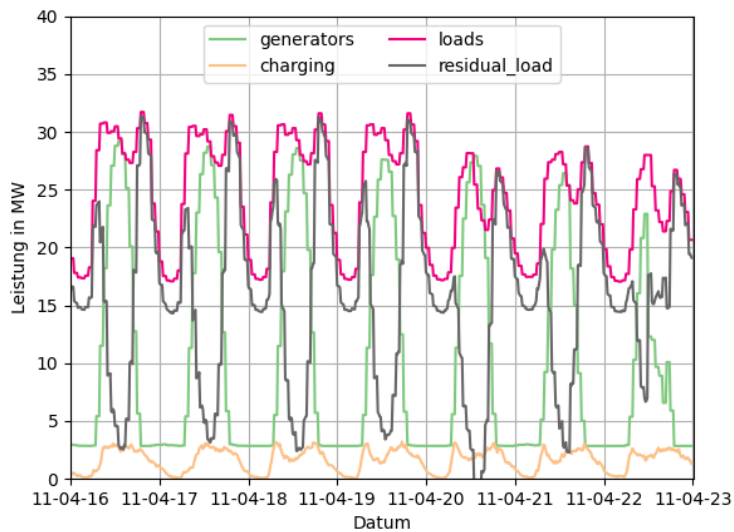


Abbildung 4.16: Leistungsfluss in der Woche mit minimaler Residuallast in Region 176

Tabelle 4.1: Abregelungsbedarf der einzelnen Komponenten im Netz 176 nach Szenario NEP C 2035

Komponente	Woche mit maximaler Residuallast (8.1.-14.1.11)	Woche mit minimaler Residuallast (16.4.-22.4.11)
Photovoltaik	0 MWh	9 MWh
Ladesäulen	3 MWh	2 MWh
sonstige Lasten	4 MWh	1 MWh

4.2 Szenario Berlin

Das Szenario Berlin dient dazu, das ursprüngliche Verortungstool mit TracBEV zu vergleichen. Hierbei geht es um die Ergebnisse der einzelnen Use Cases, Änderungen zur Nutzbarkeit des Tools oder der Struktur der Resultate werden nicht betrachtet.

In Abbildung 4.17 sind die ermittelten Schnellladepunkte zu sehen. Das Verortungstool verteilt diese mit Hilfe von Verkehrsdaten auf Tankstellen in der Region. TracBEV hat festgestellt, dass der Bedarf aus den SimBEV-Ergebnissen über die vorhandene Ladeinfrastruktur gedeckt werden kann, und hat somit keine eigenen Punkte platziert. Nach der gleichen Logik werden vom Verortungstool also zu viele Standorte ausgegeben. Dies führt wiederum zu einer besseren Abdeckung durch Ladeinfrastruktur, insbesondere am Stadtrand. Beide Methodiken sind abhängig von der Qualität der eingehenden Verkehrsdaten, der Prototyp ist zusätzlich an die Standorte von Tankstellen gebunden.

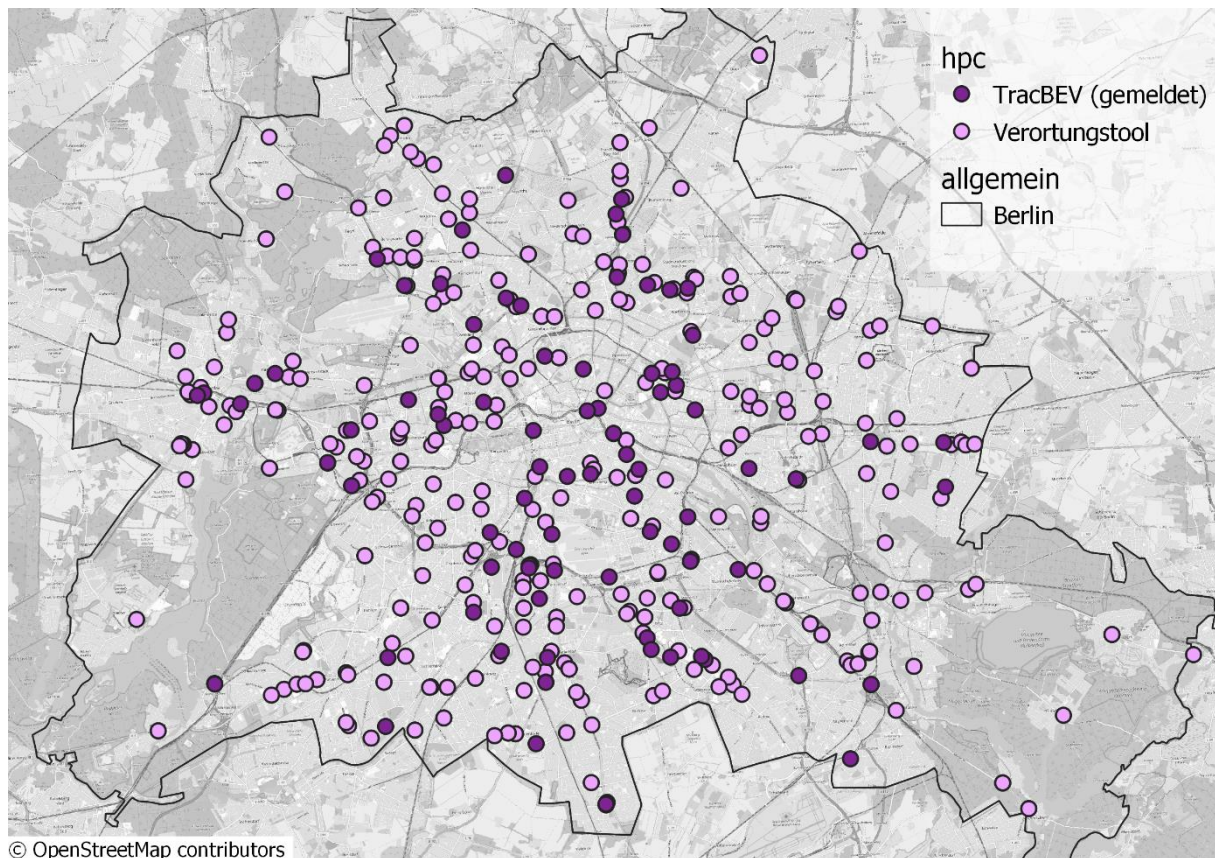


Abbildung 4.17: Vergleich der HPC-Standorte aus TracBEV und dem Verortungstool

Die Ergebnisse des Use Case Public sind in Abbildung 4.18 dargestellt. Auch hier ist zu erkennen, dass das Verortungstool eine größere Menge an Standorten ausgibt. Dabei handelt es sich um die POI aus Abbildung 3.4. TracBEV trifft dagegen eine Auswahl an den zuvor bestimmten Clusterpunkten. Bei der Verteilung öffentlicher Ladeinfrastruktur ist eine klare Verbesserung zu erkennen.

Auswertung

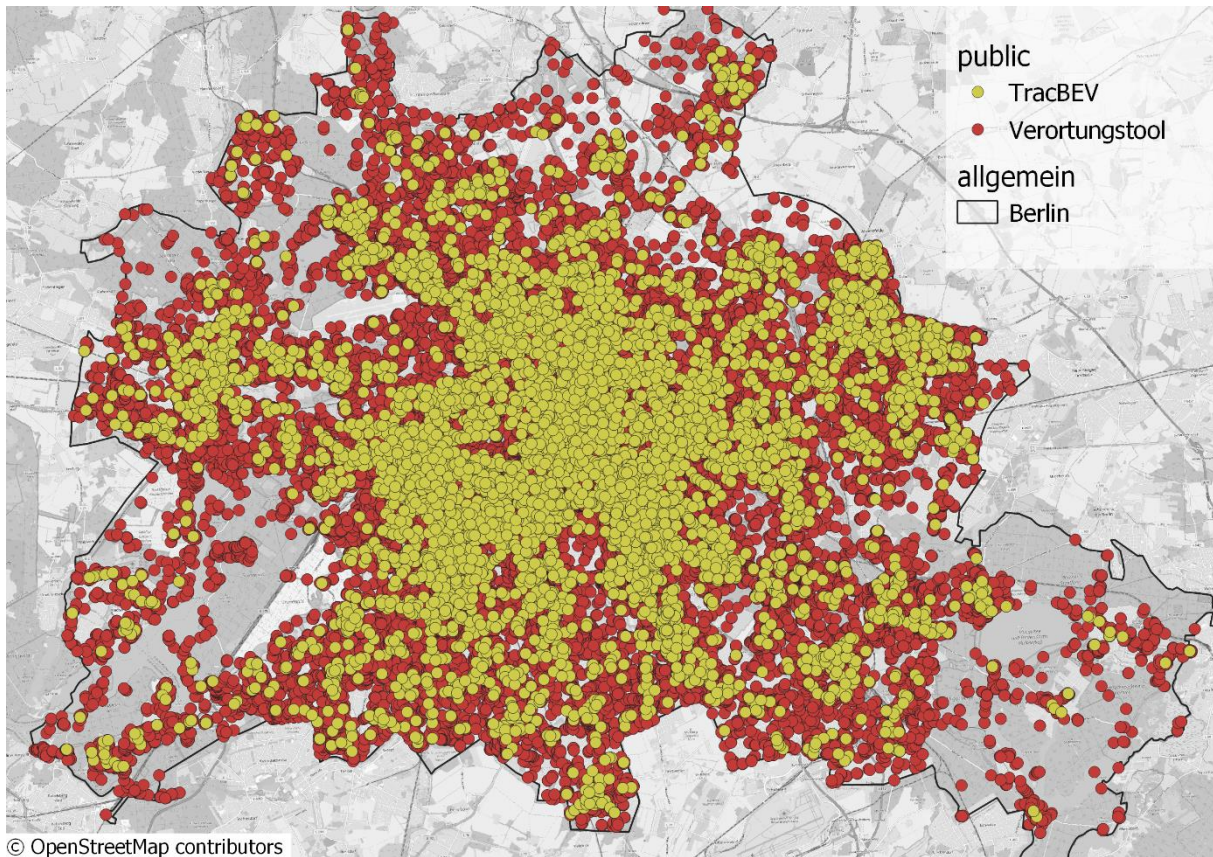


Abbildung 4.18: Vergleich der Public-Standorte aus TracBEV und dem Verortungstool

Als nächstes wird der Use Case Home betrachtet. Da es sich bei den Ergebnissen um Flächen handelt, die sich häufig überschneiden, sind die Resultate der einzelnen Tools getrennt dargestellt. TracBEV (Abbildung 4.19) verteilt die privaten Ladepunkte am eigenen Stellplatz größtenteils auf die Randbezirke. Dies hängt damit zusammen, dass momentan nur Einfamilienhäuser als potenzielle Ladestandorte betrachtet werden. Die alte Methodik (Abbildung 4.20) priorisiert das Zentrum der Stadt, da dort eine höhere Einwohnerdichte herrscht.

Auswertung

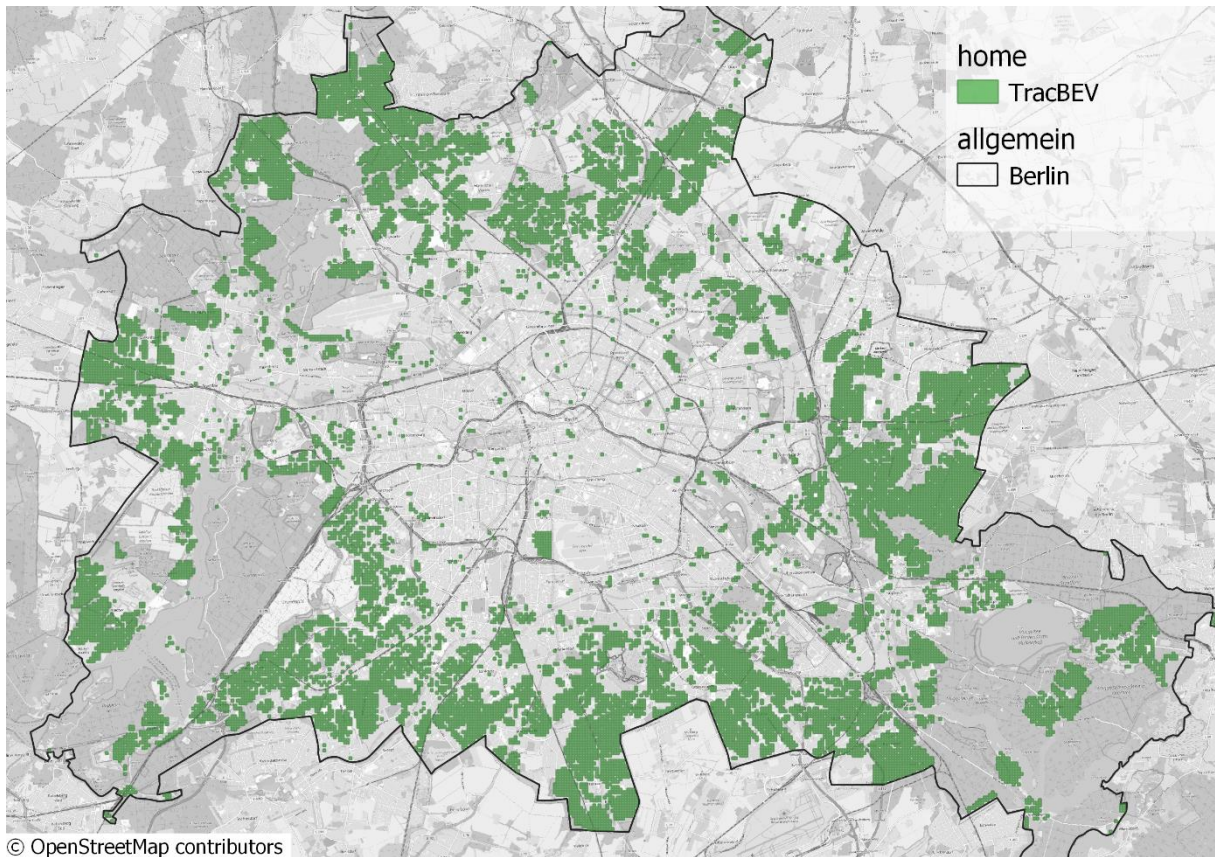


Abbildung 4.19: Ergebnisse des Use Case Home für Berlin in TracBEV

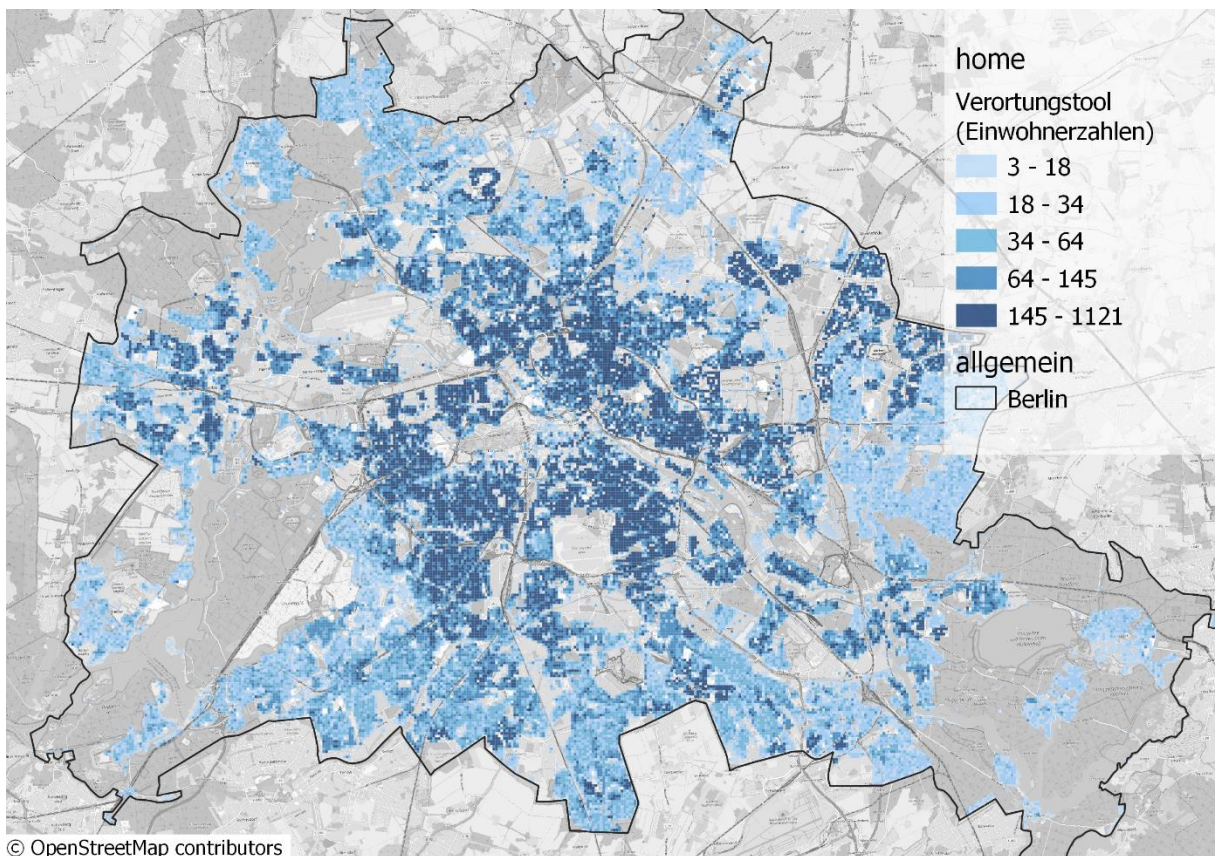


Abbildung 4.20: Ergebnisse des Use Case Home für Berlin im Verortungstool

Da die Methodik für den Use Case Work nicht überarbeitet wurde, geben beide Tools dieselben Flächen als Ergebnis (Abbildung 4.21) aus. Diese stellen vor allem Industriegebiete und gewerbliche Flächen dar.

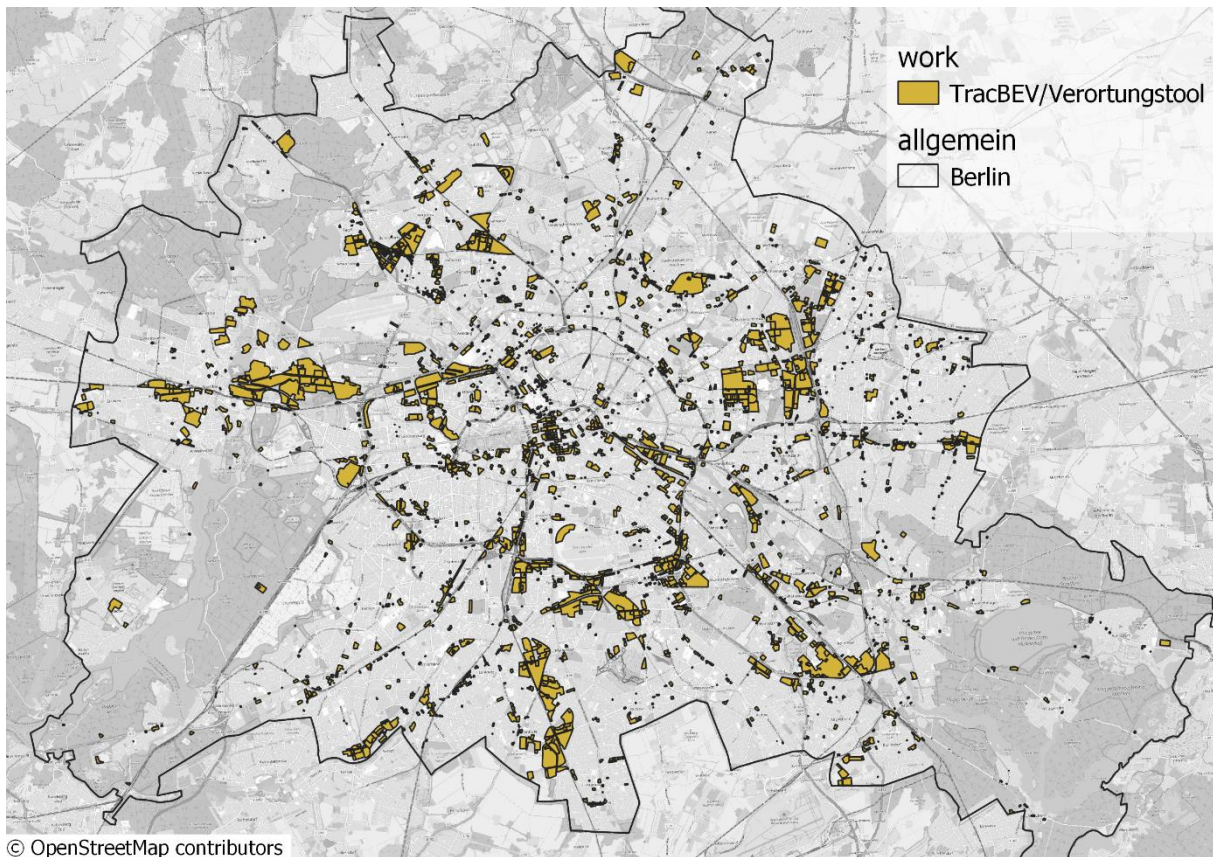


Abbildung 4.21: Ergebnisse des Use Case Work für Berlin

4.3 Szenario Frankfurt

In Abbildung 4.22 sind die Ergebnisse des Use Case Home für Frankfurt am Main zu sehen. Analog zu anderen Betrachtungen dieses Use Case sind die Ladepunkte in den Außenbezirken der Stadt angesiedelt, die Innenstadt bleibt ungenutzt. Abbildung 4.23 zeigt die Differenz der verteilten Punkte aus TracBEV abzüglich der Ladepunkte aus dem Validierungsdatensatz. Innerhalb der grünen Flächen sind von TracBEV mehr Punkte vorgesehen, bei den blauen Flächen überwiegen die Standorte des Fraunhofer IEE. Es ist zu erkennen, dass in TracBEV insgesamt weniger Ladestandorte verteilt werden. Da nur Einfamilienhäuser betrachtet werden und nur ein Ladepunkt pro Gebäude zugelassen wird, werden zu wenig Punkte verteilt, um den Ladebedarf zu decken. Im Vergleichsdatensatz werden auch Mehrfamilienhäuser betrachtet, woraus sich eine bessere Bedarfsverteilung über die gesamte Region ergibt.

Auswertung

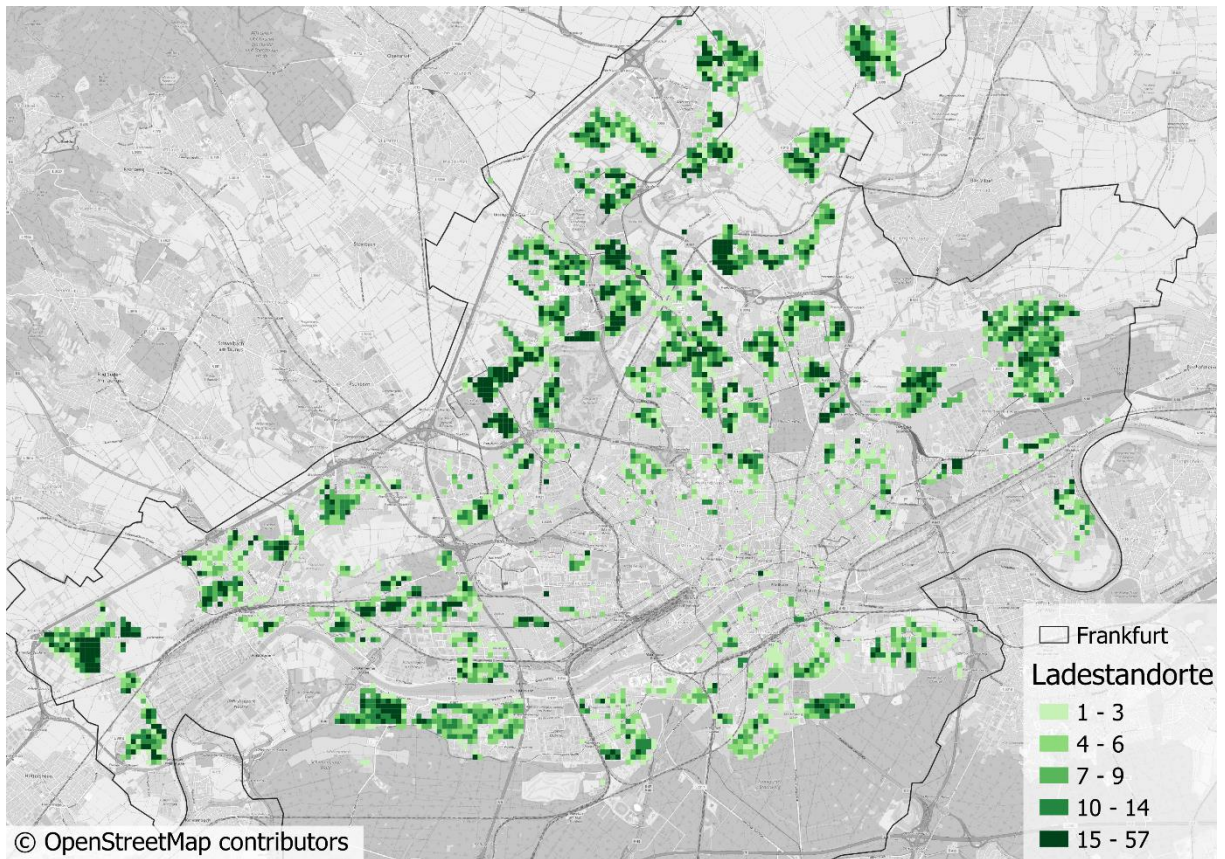


Abbildung 4.22: Ergebnisse des Use Case Home in Frankfurt

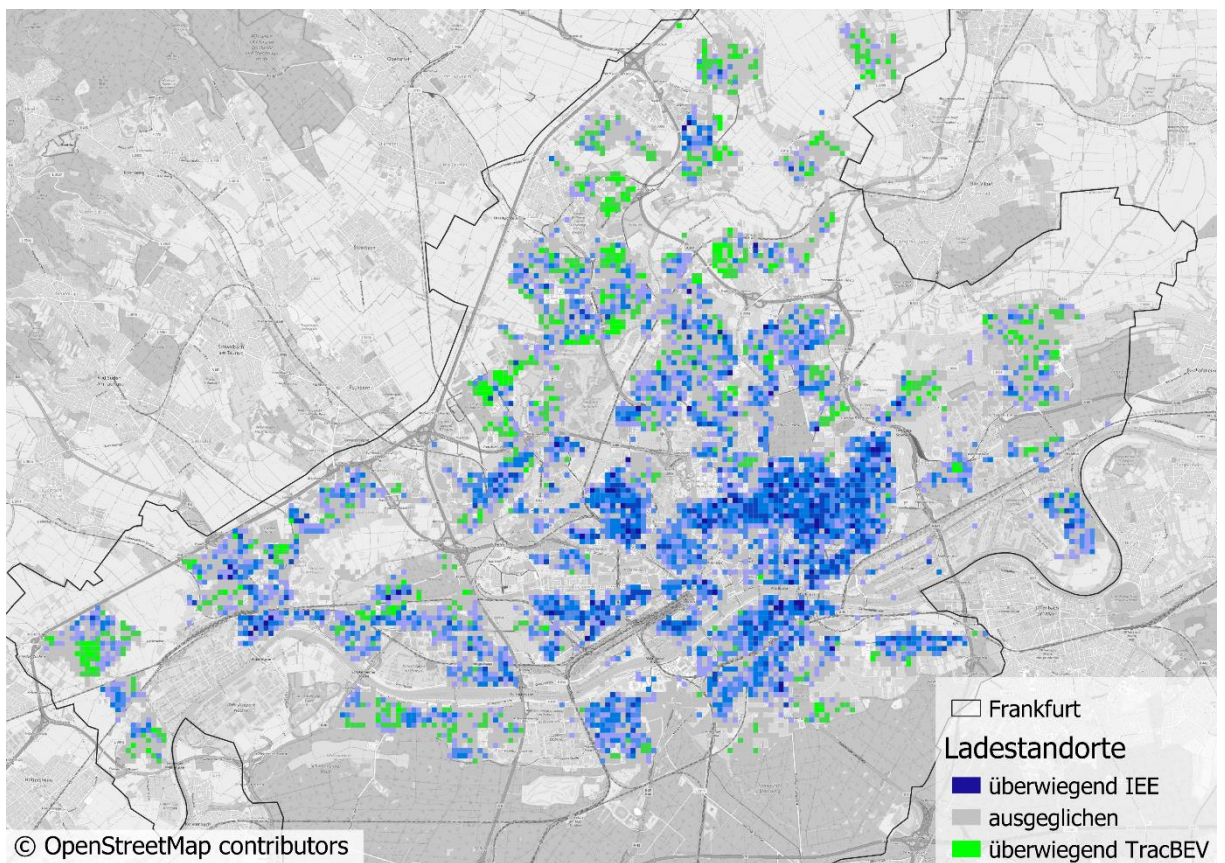


Abbildung 4.23: Unterschiede zwischen TracBEV und dem Validierungsdatensatz für den Use Case Home

5 Diskussion

5.1 Verbesserung der Use Cases

In Kapitel 4 wurde an verschiedenen Beispielen der aktuelle Stand von TracBEV vorgestellt. Allerdings weisen die Ergebnisse der Simulation einige Problem auf, die in diesem Kapitel zusammengefasst und diskutiert werden. Anschließend werden Lösungsvorschläge erarbeitet, die zur Verbesserung von TracBEV implementiert werden können.

5.1.1 HPC

Bei den HPC-Ergebnissen liegen die größten Unterschiede zwischen den Netzgebieten vor. Im schlechtesten Fall wurden keine Standorte gefunden, in anderen kann die bereits installierte Ladeinfrastruktur den gesamten Schnellladebedarf decken. Weiterhin sind die neu erstellten Ladepunkte sehr ungenau, da für die Platzierung der Mittelpunkt eines 1x1km Rasters verwendet wird. Aus diesen Problemen ergeben sich folgende Lösungsvorschläge:

- Ersatzmethodik einsetzen, falls nicht genügend Standorte in den Eingangsdaten vorhanden sind
- Schnellladen in SimBEV verbessern
- Platzierungsmethodik, um besten Standort innerhalb des Rasterfeldes zu finden
- Verbesserte Datengrundlage für die Verteilung von HPC, insbesondere Verkehrsdaten
- Potentialbestimmung für Standorte überarbeiten

Als Fallback für die Standortverteilung könnten analog zur alten Verortungsmethodik Tankstellen genutzt werden. Diese Methodik beruhte aber auf detaillierten Verkehrsdaten, die aktuell nicht deutschlandweit verfügbar sind. Es müssten also andere Faktoren herangezogen werden, um die Potentiale der Tankstellen zu bestimmen und die besten Standorte zu ermitteln.

Die Implementierung vom Schnellladen in SimBEV wird in einer anknüpfenden Abschlussarbeit betrachtet. In der jetzigen Version ist der Schnellladebedarf sehr gering, da der Use Case nur genutzt wird, wenn es keine Alternativen gibt und das Fahrzeug geladen werden muss. Diese Betrachtung entspricht nicht der Realität, in der HPC-Punkte von einigen Nutzern gezielt zum Nachladen angefahren werden. Mit der neuen Methodik wird der Schnellladebedarf voraussichtlich steigen und zeitgleich den Bedarf in anderen Use Cases senken.

Die letzten drei Lösungsvorschläge beziehen sich auf eine genauere und verbesserte Platzierung der Ladestandorte. Aus Zeitgründen wurde mit der Nutzung des bestehenden HPC-Tools bewusst eine simplifizierte Methode gewählt. Daher ergibt sich hier viel Potential, um TracBEV zu verbessern. Das Erstellen der Eingangsdaten könnte auch als eigene Funktion implementiert werden und damit im Umfang von TracBEV enthalten sein.

5.1.2 Public

Die Verteilung der öffentlichen Ladepunkte ist direkt vom Clusterverfahren abhängig, welches momentan recht simpel aufgebaut ist (3.1.3). Eine differenzierte Clusterbildung sowie eine bessere Auswahl des repräsentativen Punktes wären logische Weiterentwicklungen des Use Case Public.

Ein Problem, welches in den Testszenarien aufgetreten ist, sind abgelegene Ladepunkte ohne verfügbaren Netzanschluss. Um diese zu vermeiden, müsste eine Netzbetrachtung in TracBEV durchgeführt werden. Hierfür ist es aber schwierig, akkurate offene Daten zu erhalten. Es kann auch argumentiert werden, dass diese Ladepunkte trotzdem sinnvoll platziert sind, solange das Problem mit dem Netzanschluss gelöst werden kann. So sind Parkplätze, die am Beginn einer Wanderroute liegen, hervorragend zum Laden mit geringer Leistung geeignet. Als Alternative zum Netzanschluss könnte ein Inselnetz aus Erneuerbaren Energien und einem Energiespeicher dienen.

5.1.3 Home

Im Use Case Home werden Ladepunkte auf 100x100m Raster verteilt, abhängig von der Anzahl der Einfamilienhäuser innerhalb der jeweiligen Fläche. Der Vergleich mit einem Validierungsdatensatz hat die Schwächen der aktuellen TracBEV-Methodik hervorgehoben. Es ergeben sich folgende Probleme:

- Mehrfamilienhäuser werden ignoriert
- Nur ein Stellplatz pro Gebäude
- Ungenaue Platzierung der Punkte
- Unvollständige Eingangsdaten

Generell ist festzustellen, dass der Gebäudetyp ein wichtiger Parameter bei der Verteilung ist. Statt der Reduzierung auf Ein- und Mehrfamilienhäuser könnten Gebäudetypen differenzierter betrachtet werden. Dabei können Wahrscheinlichkeiten für einen privaten Stellplatz sowie deren Anzahl für jeden Gebäudetypen einzeln bestimmt werden. Auch hier müssen gute Daten vorliegen, auf denen die Parametrierung aufbauen kann.

Für die genaue Platzierung der Punkte gibt es Methoden, um die Gebäudetypen aus den Zensusdaten mit einzelnen Adressen und den zugehörigen Standorten zu verbinden. Diese erfordern große Datenmengen, die nicht im Umfang des Tools bereitgestellt werden. Es müsste eine Voruntersuchung einer Region stattfinden, um die präzisen Standorte zu ermitteln. Für ein deutschlandweites Tool wie TracBEV ist der Aufwand, diese Daten für jede Region bereitzustellen, momentan zu hoch.

Das Problem der unvollständigen Eingangsdaten ist in Abschnitt 4.1.3 dargestellt. Der Zensus 2011 stellt keine besseren Daten zur Verfügung. Ein neuer Zensus ist momentan in Arbeit [45] und könnte die Datengrundlage für TracBEV stark verbessern.

5.1.4 Work

Der Use Case Work soll Standorte für das private Laden auf dem Firmenparkplatz finden. Die genutzte Methodik ist dafür nur mittelmäßig gut geeignet. Statt auf Kartentags zu vertrauen, müsste ein Datensatz mit vorhandenen Firmenparkplätzen genutzt werden. Auch hierfür fehlen die öffentlichen Daten.

Falls eine Betrachtung der Netzverfügbarkeit in TracBEV implementiert wird, könnte dieser Use Case davon profitieren. So würden zum Beispiel landwirtschaftliche Flächen herausgefiltert werden, die weder einen Netzanschluss besitzen noch geeignet für das Laden von Mitarbeiterfahrzeugen sind.

5.2 Netz

Die Netzbetrachtung über eDisGo liefert gute Ergebnisse. Allerdings ist die Schnittstelle zu TracBEV noch nicht auf einer stabilen Version der Software verfügbar. Hier könnte eine leicht bedienbare Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden, die eine Überprüfung der erstellten Ladepunkte erlaubt. Für die wenigen Netzsimulationen, die in dieser Arbeit durchgeführt wurden, musste einiges am Code verändert werden. Außerdem sind die Simulationen sehr zeitaufwändig. Sowohl die Erstellung der eDisGo-Objekte als auch die Leistungsrechnung und die Bestimmung des Abregelungsbedarfs können mehrere Tage in Anspruch nehmen.

Am Beispiel des Netzgebiets 176 ist zu erkennen, dass es positive Wechselwirkungen zwischen Elektromobilität und fluktuierenden Erneuerbaren Energien geben kann. Voraussetzung dafür ist der Ausbau des Netzes, damit es nicht zu Engpässen und damit zu Abregelung kommt. Eine Möglichkeit, um Abregelung zu minimieren, stellen Energiespeicher dar. Diese können je nach Situation sowohl als Last als auch als Erzeuger am Netz teilnehmen. In der Niederspannungsebene können sie sowohl Last- als auch Erzeugungsspitzen ausgleichen. Auch wenn diese bilanziell das gesamte Stromnetz nicht stören würden, können sie zu Engpässen im lokalen Netz führen. Auch Elektrofahrzeuge können diese Dienstleistung übernehmen. Mit einem netzdienlichen Lademanagement kann der angeschlossene Pkw genau dann laden, wenn die niedrigste Residuallast vorliegt. Falls Fahrzeuge und Ladepunkte in Zukunft Vehicle-to-Grid fähig sein sollten, könnten sie auch Lastspitzen abfangen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das im Zuge dieser Arbeit entwickelte Softwaretool TracBEV erlaubt die Verteilung von Ladepunkten in einer Region. Hierbei wird in die Use Cases HPC, Public, Home und Work unterschieden. Die Bewertung der Standorte basiert auf öffentlichen Daten, die zunächst aufbereitet werden müssen. Auf der Basis von Testszenarien werden die implementierten Methoden getestet und bewertet. Dabei hat sich ergeben, dass sinnvolle Ergebnisse geliefert werden, es aber in Einzelfällen zu einer schlechten Standortauswahl kommt. Außerdem sind die öffentlichen Eingangsdaten schlecht aufgelöst, wodurch die Platzierung nur ungenau erfolgen kann.

Der Hochlauf von Elektromobilität und der damit verbundene Ausbau der Ladeinfrastruktur kann nicht ohne Rücksicht auf das Netz geschehen. Akkurate Aussagen zur entstehenden Netzbelastung sind notwendig, um das Stromnetz darauf vorzubereiten. TracBEV kann hierzu einen Anteil leisten, indem es Ladebedarfe örtlich verteilt. Zu jenem Zweck ist es bereits in die Tool Chain zur Netzberechnung eingegliedert, die am RLI entwickelt wird. In diesem Zuge wird es Weiterentwicklungen an der Funktionsweise und den Methoden von TracBEV geben. Die nötigen Anpassungen der Methodik sind in Kapitel 5.1 detailliert.

Als öffentlich zugängliches Tool kann der Code von Interessierten eingesehen und genutzt werden. Damit wird die Verwendung und Weiterentwicklung von TracBEV über den Rahmen dieser Arbeit hinaus ermöglicht.

7 Literaturverzeichnis

- [1] *Klimaschutzgesetz: KSG*, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/index.html>
- [2] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Hg., *Verkehr in Zahlen 2021/2022*, 50. Aufl. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 2021.
- [3] *SimBEV*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/rl-institut/simbev>
- [4] *SpiceEV: Simulation Program for Individual Charging Events of Electric Vehicles*. [Online]. Verfügbar unter: https://github.com/rl-institut/spice_ev
- [5] *TracBEV: Tool for regional allocation of charging infrastructure from SimBEV data*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/rl-institut/tracbev>
- [6] Umweltbundesamt, *Fahrleistungen, Verkehrsleistung und "Modal Split"*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#personenverkehr> (Zugriff am: 27. Februar 2022).
- [7] Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics, „The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels“, 2018.
- [8] ElektroMobilität NRW, *Vorteile E-Auto*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektromobilitaet.nrw/privatnutzer/vorteile-e-auto/> (Zugriff am: 17. April 2022).
- [9] ADAC, „Glossar: Elektromobilität von A – Z“, ADAC, 6. Nov. 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/glossar-elektromobilitaet/>. Zugriff am: 17. April 2022.
- [10] The Mobility House, *Vehicle-to-Grid (V2G): Elektroauto als Stromspeicher nutzen*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mobilityhouse.com/de_de/vehicle-to-grid (Zugriff am: 17. April 2022).
- [11] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, *Das deutsche Stromnetz*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/abbildung-das-deutsche-stromnetz.html> (Zugriff am: 7. März 2022).
- [12] B. Bayer, A. Marian, P. Matschoss und H. Thomas, „Integration von Photovoltaikanlagen in die deutschen Niederspannungsnetze“, 2017.
- [13] S. Mischinger, E.-L. Limbacher, H. Seidl, M. Ritzau und D. Nailis, *Höhere Auslastung des Stromnetzes: Maßnahmen zur höheren Auslastung des Bestandsnetzes durch heute verfügbare Technologien* (Zugriff am: 17. April 2022).
- [14] N. Koch, „Unterschiede zwischen Ladezeiten: 11kW, 22kW und AC/DC-Laden“, *Elektroauto-News.net*, 22. Okt. 2021, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektroauto-news.net/2021/unterschiede-ladezeiten-11kw-22kw-ac-dc-laden>. Zugriff am: 22. März 2022.
- [15] W. Rudschies, „Elektroautos auf der Langstrecke: Wie kann das funktionieren?“, ADAC, 19. Feb. 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/elektromobilitaet/schnellladen-langstrecke-ladepkurven/>. Zugriff am: 22. März 2022.

- [16] GitHub, *Charging strategies · rl-institut/spice_ev Wiki*. [Online]. Verfügbar unter: https://github.com/rl-institut/spice_ev/wiki/Charging-strategies (Zugriff am: 21. März 2022).
- [17] open_eGo, *open_eGo*. [Online]. Verfügbar unter: <https://openegoproject.wordpress.com/> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [18] eDisGo: *Optimization of flexibility options and grid expansion for distribution grids based on PyPSA*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/openego/eDisGo>
- [19] GitHub, *openego/ding0: Distribution Network Generator*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/openego/ding0> (Zugriff am: 17. April 2022).
- [20] PyPSA: *Python for Power System Analysis*. [Online]. Verfügbar unter: <https://pypsa.org/>
- [21] infas Institut für Sozialwissenschaft, *Mobilität in Deutschland – Publikationen*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/publikationen2017.html> (Zugriff am: 22. März 2022).
- [22] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, *Regionalstatistische Raumtypologie (RegioStaR)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/regionalstatistische-raumtypologie.html> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [23] infas Institut für Sozialwissenschaft, „Mobilität in Deutschland 2017: Ergebnisbericht“.
- [24] OpenStreetMap, *OpenStreetMap*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.openstreetmap.org/#map=5/51.330/10.453> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [25] Statistisches Bundesamt, *ZENSUS2011 - Bevölkerungs- und Wohnungszählung 2011*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zensus2011.de/DE/Home/Aktuelles/DemografischeGrunddaten.html> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [26] Bundesanstalt für Straßenwesen, *Automatische Straßenverkehrszählung*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/zaehl_node.html (Zugriff am: 21. März 2022).
- [27] Bundesanstalt für Straßenwesen, *Automatische Straßenverkehrszählung - Automatische Zählstellen 2019*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Daten/2019_1/Jawe2019.html;jsessionid=B7530DF218FE0A274FAC63C716CB57A6.live21301?nn=1819490 (Zugriff am: 17. April 2022).
- [28] Bundesnetzagentur, *Elektromobilität: Öffentliche Ladeinfrastruktur*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/E-Mobilitaet/start.html (Zugriff am: 21. März 2022).
- [29] *Ladesäulenverordnung: LSV*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/lsv/index.html#BJNR045700016BJNE000500000>
- [30] M. Schiel, „TracBEV input data“. Datensatz, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://zenodo.org/record/6466480#.YmE9xtPP1hE>. Zugriff am: 24. April 2022.
- [31] Klokan Technologies GmbH, *ETRS89-extended / LAEA Europe - EPSG:3035*. [Online]. Verfügbar unter: <https://epsg.io/3035> (Zugriff am: 17. April 2022).

- [32] Geofabrik, *Geofabrik Download Server*. [Online]. Verfügbar unter: <https://download.geofabrik.de/> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [33] OpenStreetMap Wiki, *DE:PBF Format*. [Online]. Verfügbar unter: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:PBF_Format (Zugriff am: 17. April 2022).
- [34] OpenStreetMap Wiki, *Osmconvert*. [Online]. Verfügbar unter: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Osmconvert> (Zugriff am: 17. April 2022).
- [35] OpenStreetMap Wiki, *Osmfilter*. [Online]. Verfügbar unter: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Osmfilter> (Zugriff am: 17. April 2022).
- [36] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, *Statistikportal: Einkommen (Kreise)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statistikportal.de/de/vgrdl/ergebnisse-kreisebene/einkommen-kreise> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [37] Der Bundeswahlleiter, *Publikationen - Der Bundeswahlleiter*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundeswahlleiter.de/bundestagswahlen/2017/publikationen.html> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [38] Statistisches Bundesamt, *Tourismus in Zahlen - 2019*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Gastgewerbe-Tourismus/Publikationen/Downloads-Tourismus/tourismus-in-zahlen-1021500197005.html> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [39] S. Maneewongvatana und D. M. Mount, „Analysis of approximate nearest neighbor searching with clustered point sets“, 26. Jan. 1999. [Online]. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/cs/9901013>.
- [40] B. Schachler, „E-Mobility Study: Assessment of coordinated charging considering distribution grid restrictions“, Reiner Lemoine Institut gGmbH, nichtöffentlich, Nov. 2020.
- [41] Bundesnetzagentur, „Genehmigung des Szenariorahmens zum NEP 2035“, 2021.
- [42] eGon, *eGon*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ego-n.org/> (Zugriff am: 24. April 2022).
- [43] GitHub, *openego/eGon-data*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/openego/eGon-data> (Zugriff am: 24. April 2022).
- [44] G. Thomsen, *Regionalisierung von Ladestellen für Elektrofahrzeuge*. am Fraunhofer IEE, 2020.
- [45] Statistisches Bundesamt, *Was ist neu beim Zensus 2022?*, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.zensus2022.de/DE/Aktuelles/PM_Was_ist_neu_beim_Zensus.html

8 Eigenständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass

- ich die vorliegende wissenschaftliche Arbeit selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe,
- ich andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt habe,
- ich die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe,
- die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfbehörde vorgelegen hat.

Berlin, 24.04.2022

M. Schiel

A. Anhang

Tabelle A.1: Inhalt der Variablen `config_dict`

Schlüssel	Erklärung	Pythontyp
run_hpc, run_public, run_home, run_work	legt fest, welcher Use Case betrachtet wird	boolean
boundaries	Geometrien aller Regionen	GeoDataFrame
scenario_name	Name des Szenarioordners	str
hpc_points	HPC-Standorte	GeoDataFrame
poi_data	POI Cluster mit Gewicht	GeoDataFrame
public_positions	vorhandene öffentliche Ladepunkte	GeoDataFrame
zensus	Haustypen aus Zensusdaten	GeoDataFrame
home_prob	Anteil an privaten Lademöglichkeiten zuhause	float
num_car	Anzahl an Fahrzeugen je Typ und Region	GeoSeries
work_dict	enthält Gewichtungsfaktoren (float) für Flächennutzungen „retail“, „commercial“, „industrial“	dict
work	Geometrien aller Flächen mit Nutzungstyp äquivalent zu <code>work_dict</code>	GeoDataFrame
uc_dict	enthält Werte, die an die Use Case Funktionen übergeben werden, s. Tabelle A.2	dict

Anhang

Tabelle A.2: Inhalt der Variablen *uc_dict*

Schlüssel	Erklärung	Pythontyp
timeseries	enthält SimBEV-Zeitreihen für jede Region	dict, DataFrame
visual	legt fest, ob Plots erstellt werden	boolean
charge_info	enthält Leistungswerte und Gleichzeitigkeitsfaktoren für Public und HPC	dict
result_dir	Pfad zum Ergebnisordner	Path
region	Geometrie der aktuellen Region	GeoSeries
key	Name der aktuellen Region	str

Tabelle A.3: Fahrzeugdaten in *SimBEV*

	max Leistung AC in kW	max Leistung DC in kW	Batteriekapazität in kWh	Verbrauch in kWh/km
bev_mini	11	50	60	0,1397
bev_medium	22	50	90	0,1746
bev_luxury	50	150	110	0,2096
phev_mini	3,7	0	14	0,1425
phev_medium	11	0	20	0,1782
phev_luxury	11	0	30	0,2138

Tabelle A.4: Auszug aus der Gewichtungstabelle für *POI*

OSM-Key	OSM-Value	Beschreibung	LIS-Relevanz (0-10)	Frequentierung des POIs (0-10)	weight
amenity	animal_boarding	Tierpension	3	2	2,5
amenity	animal_shelter	Tierheim, Tierasyl	5	5	5
amenity	arts_centre	Kulturzentrum	7	8	7,5
amenity	atm	Geldautomat / Bankomat	2	10	6
amenity	bank	Bank, Geldinstitut	8	9	8,5