



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN



## Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades einer

Diplom-Ingenieurin

# Optimale räumliche Verteilung von Ladestationen für Elektromobilität

eingereicht an der  
Technischen Universität Wien

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

Betreuer: Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Hans Auer  
Assistent: Dipl.-Ing. Theresia Perger

von

Natalia Kowalska, BSc  
0801132

Wien, Juni 2020



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ausdrücklich bei meinen Betreuern Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Hans Auer und Dipl.-Ing. Theresia Perger bedanken, die mich beim Erstellen dieser Diplomarbeit zu jedem Zeitpunkt bestmöglich unterstützt haben.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich auch bei meinem Partner für die vielen ermutigenden Worte, die ständige Motivation und den großen Zuspruch! Danke, dass du immer an mich glaubst!

Ein besonderer Dank gilt auch meinen liebsten Freunden, die mir in vielen Phasen des Studiums eine große Stütze waren. Herzliches Danke hierbei an Irene, der ich viele unvergessliche Erinnerungen, gerade zu Beginn dieses Studiums, zu verdanken habe. Es freut mich besonders, dass durch dieses Studium so eine tolle Freundschaft entstanden ist! Ein ausdrücklicher Dank gilt auch Alice, die mir stets mit gutem Rat und viel Humor zur Seite stand und mich vor allem beim Schreiben dieser Arbeit stets aufgeheitert und motiviert hat. Ganz besonders bedanken möchte ich mich auch bei Jenny für den stetigen Zuspruch in allen Lebensphasen - mit dir fliegen die Fische auch bei Nacht!

Zu guter Letzt möchte ich mich an dieser Stelle auch bei meinen Eltern bedanken, ohne die diese Ausbildung niemals möglich gewesen wäre!

Diese Diplomarbeit möchte ich aber vor allem meinem verstorbenen Vater widmen. Danke, dass du mir stets vor Augen geführt hast wie wichtig Bildung im Leben ist!



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Kurzfassung

Mobilität ist heute ein essentieller Bestandteil unseres Lebens. Den unzähligen Vorteilen, die mit Mobilität einhergehen stehen jedoch auch Kehrseiten gegenüber. So ist Verkehr nach wie vor einer der Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen in Österreich. Um eine Dekarbonisierung des Verkehrssektors zu erreichen und damit die europäischen Energie- und Klimaschutzziele einhalten zu können, führt somit langfristig kein Weg an Elektromobilität vorbei. Angesichts des damit zu erwartenden starken Zuwachses an Elektrofahrzeugen, steigt auch der Bedarf nach einem gut ausgebauten öffentlichen Ladestellennetz. Die Tatsache, dass, vor allem in ländlichen Regionen, ein Großteil aller Ladevorgänge von zu Hause aus erfolgt, wirft jedoch die Frage auf, wie viel öffentliche Ladeinfrastruktur tatsächlich notwendig ist. Das zentrale Ziel dieser Diplomarbeit ist es daher, die optimale Anzahl und räumliche Verteilung öffentlicher Ladepunkte zu ermitteln. Dazu wird in Matlab ein Optimierungsmodell entwickelt, das unter Berücksichtigung unterschiedlichen Ladeverhaltens, den öffentlichen Ladebedarf des privaten Individualverkehrs möglichst optimal abdeckt. Dabei werden private, gewerbliche und öffentliche Ladevorgängen differenziert betrachtet. Im Hauptfokus stehen Berufsfahrten, weswegen das entwickelte Modell auf ein klassisches Pendlergebiet in Niederösterreich (St. Pölten und Umgebung) angewendet wird. Der Verkehrsfluss innerhalb des Gebietes wird anhand von Statistiken modelliert und stellt die wichtigste Datengrundlage des Modells dar. Die Ergebnisse zeigen, dass auch im Falle einer kompletten Elektrifizierung des privaten Verkehrssektors kein erheblich großer Ladeinfrastrukturausbau zur Energiebedarfsdeckung des privaten Individualverkehrs der betrachteten Region notwendig sein wird. Es ist allerdings ein deutlicher Zusammenhang zwischen steigender Bevölkerungsdichte und der Dichte der öffentlichen Ladepunkte zu erkennen. Das begründet sich einerseits in den unterschiedlichen Wohnverhältnissen und damit einhergehend anderen Voraussetzungen für das private Laden. Andererseits sind dichter besiedelte Regionen vermehrt attraktive Pendlerziele mit erhöhtem Verkehrsaufkommen. Die zu erwartenden technologischen Entwicklungen hinsichtlich der Effizienz der Elektroautos und der Ladeleistung senken die Anzahl der benötigten öffentlichen Ladepunkte nochmals deutlich. Es gilt jedoch zu beachten, dass das entwickelte Modell nur den Ladebedarf des privaten Individualverkehrs errechnet. Um einen vollständigen Bedarf zu ermitteln müsste unter anderem auch der gewerbliche Verkehr mitbetrachtet werden.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Abstract

Mobility is an essential part of our lives. Although there are countless advantages that come from being mobile, there are also some downsides. For instance, traffic is still one of the main causes of greenhouse gas emissions in Austria. In the long term, there is no way around electromobility in order to achieve a decarbonization of the transport sector and thus being able to meet the European energy and climate protection targets. Considering the expected strong growth in electric vehicles, the need for a well-developed public charging station network is also increasing. However, the fact that, a large part of all charging is done from home, especially in rural areas, raises the question of how much public charging infrastructure is actually needed. The main goal of this master's thesis is therefore to determine the optimal amount and spatial distribution of public charging points. For this purpose, an optimization model is developed in Matlab which, taking into account different charging behavior, optimally fulfills the public charging needs of private individual transport. In addition, a distinction is made between private, commercial and public charging. The main focus is on commuting trips, which is why the developed model is applied to a classic commuter area in Lower Austria (St. Pölten and the surrounding area). The data used in the model is based on detailed statistics of traffic flows in the considered area. The results show, that even if the transport sector becomes completely electrified, it will not be necessary to expand the charging infrastructure to a large extent in order to cover the energy needs of private transport in the considered region. However, there is a clear correlation between increasing population density and the density of public charging points found. On the one hand, this is due to the different living conditions in more densely populated areas and therefore different requirements for private charging. On the other hand, those regions are also more attractive commuter destinations with increased traffic. The expected technological improvements regarding the efficiency of electric cars and charging power further reduce the number of required charging points. However, to determine the complete need of public charging stations, commercial traffic would also have to be considered.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>vi</b>
<b>Abstract</b>	<b>viii</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	1
1.2. Fragestellung und Methode . . . . .	2
1.3. Aufbau der Arbeit . . . . .	2
<b>2. Aktueller Stand der Entwicklungen</b>	<b>5</b>
2.1. Wissenschaftliche Publikationen . . . . .	7
2.2. Wissenschaftlicher Beitrag dieser Arbeit . . . . .	8
<b>3. Methode</b>	<b>9</b>
3.1. Überblick . . . . .	9
3.2. Topologie des betrachteten Gebietes . . . . .	10
3.3. Modellierung der Fahrmuster . . . . .	16
3.3.1. Statistische Daten . . . . .	22
3.3.2. Ladeverhalten . . . . .	23
3.4. Modellierung der Ladeinfrastruktur . . . . .	27
3.5. Optimierungsmodell . . . . .	29
3.5.1. Mathematische Beschreibung . . . . .	31
3.5.2. Ablaufdiagramm . . . . .	35
3.5.3. Daten und Annahmen . . . . .	38
<b>4. Ergebnisse: Öffentliche Ladestationen</b>	<b>43</b>
4.1. Einfluss des Elektrofahrzeuganteils . . . . .	43
4.1.1. Anteil von 100% . . . . .	45
4.1.2. Anteil von 50% . . . . .	47
4.1.3. Anteil von 10% . . . . .	48
4.2. Einfluss des Wochentages . . . . .	50
4.3. Einfluss der Bevölkerungsdichte . . . . .	54

## Inhaltsverzeichnis

<b>5. Sensitivitätsanalysen</b>	<b>59</b>
5.1. Technologische Entwicklung der Elektrofahrzeuge . . . . .	59
5.1.1. Einfluss der Effizienz des Fahrzeuges . . . . .	59
5.1.2. Einfluss der Batteriekapazität des Fahrzeuges . . . . .	63
5.2. Technologische Entwicklung der Ladesäulen . . . . .	66
<b>6. Schlussfolgerungen</b>	<b>71</b>
<b>Literatur</b>	<b>73</b>
<b>Anhang</b>	<b>79</b>
<b>A. Zusätzliche Abbildungen</b>	<b>79</b>
A.1. Ergebnisse: öffentliche Ladestationen . . . . .	79
A.1.1. Elektrofahrzeuganteil von 100% . . . . .	79
A.1.2. Elektrofahrzeuganteil von 50% . . . . .	81
A.1.3. Elektrofahrzeuganteil von 10% . . . . .	84

# 1. Einleitung

## 1.1. Motivation

Um die Ziele des Europäischen Energiefahrplans einhalten zu können, muss die EU ihre Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80% senken [1]. Da der Verkehrssektor als einer der Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen gilt und hier der höchste Anteil auf den Straßenverkehr zurück zu führen ist, wird Elektromobilität eine wichtige Rolle in der Verwirklichung dieser Ziele beigemessen [2][3].

Laut einer Studie des österreichischen Umweltbundesamts [4], sind bereits heute die technischen Voraussetzungen für einen, bis zum Jahr 2050 von fossilen Energieträgern freien Verkehr gegeben. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich Elektromobilität als führende Antriebstechnologie in Österreich durchsetzen wird [4]. Als Basis für Diskussionen der nationalen Klimapolitik, erstellte das Umweltbundesamt energiewirtschaftliche Szenarien im Hinblick auf die Realisierung der Klimaziele 2030 und 2050 [5]. Darunter finden sich auch zwei Szenarien für die Entwicklung der Elektromobilität in Österreich [5]. Das erste, pessimistischere Szenario „WEM“, prognostiziert für das Jahr 2030, 929 000 Elektroautos (Zahlen inklusive PHEVs<sup>1</sup>). Das ambitionierte Szenario „WAM“ rechnet dagegen mit 1 693 000 Elektrofahrzeugen auf Österreichs Straßen im Jahr 2030. Geht man von aktuell 90 155 Elektrofahrzeugen aus [6], und nimmt Szenario „WEM“ als das wahrscheinlichere von beiden an, würde das noch immer eine Steigerung um mehr als das 10-fache bedeuten. Zukunftsprognosen solcher Art sind zwar aufgrund vieler äußerer Faktoren schwierig, außer Zweifel steht jedoch, dass in den kommenden Jahren ein starker Zuwachs an Elektromobilität zu erwarten ist.

Damit einher geht klarerweise auch ein erhöhter Bedarf an ausreichender Ladeinfrastruktur um die erwünschte Reichweite und eine gewisse „Ladesicherheit“ gewährleisten zu können. Ohne ein entsprechend gut ausgebautes Ladenetz, bleibt die Anschaffung eines Elektrofahrzeugs für viele Autofahrer unattraktiv. Sichtbare Ladeinfrastruktur hingegen, steigert für viele KFZ-Besitzer das Vertrauen in die neue Technologie. Neben der konkreten Anzahl an öffentlichen Ladepunkten, spielt also vor allem auch ihre optimale geografische Platzierung eine entscheidende Rolle für die Zukunft der Elektromobilität.

---

<sup>1</sup>Plug-In Hybrid-Fahrzeuge

## 1. Einleitung

### 1.2. Fragestellung und Methode

Das zentrale Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die optimale Anzahl und räumliche Verteilung öffentlicher Ladestationen zur Ladebedarfsdeckung des privaten Individualverkehrs zu ermitteln. Ein spezieller Fokus wird auf die differenzierte Betrachtungsweise unterschiedlicher Ladevorgänge und Ladepräferenzen einzelner Fahrer gelegt. Dabei wird zwischen privaten, gewerblichen und öffentlichen Ladevorgängen unterschieden.

Hierfür wird in Matlab ein Optimierungsmodell erstellt, das unter Berücksichtigung einiger Nebenbedingungen den öffentlichen Ladebedarf möglichst optimal abdeckt. Ziel des Optimierungsmodells ist somit die Berechnung der minimalen Anzahl an öffentlichen Ladepunkten inklusive ihrer optimalen geografischen Verteilung. Das erfolgt bei gleichzeitiger Berücksichtigung unterschiedlicher Ladeverhalten der Fahrer. Im Hauptfokus stehen Berufsfahrten, weswegen das entwickelte Modell auf ein klassisches Pendlergebiet in Niederösterreich (St. Pölten und Umgebung) angewendet wird.

Sämtliche Modellrechnung werden für unterschiedliche Entwicklungen der Elektromobilität betrachtet. Ausgehend von einem Elektrofahrzeuganteil von 10%, der in einigen Jahren als realistisch erscheint, bis hin zu einer kompletten Elektrifizierung des privaten Verkehrssektors.

Durch die Variation verschiedener Parameter, können unterschiedliche Szenarien der zukünftigen technologischen Entwicklung betrachtet und deren Einflüsse auf das Optimierungsmodell untersucht werden.

### 1.3. Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird ein kurzer Überblick über die aktuellen Entwicklungen der Elektromobilität in Österreich und Europa, sowie wissenschaftliche Publikationen zur optimalen Platzierung von Ladestationen gegeben.

Kapitel 3 beschreibt zunächst die Erarbeitung der Datengrundlage, die zur Abbildung eines aussagekräftigen Mobilitätsverhaltens notwendig ist. Anschließend wird auf die mathematische Formulierung des Optimierungsmodells eingegangen. Ebenso werden die, für die Berechnung des Referenzszenarios und aller Sensitivitätsanalysen, notwendigen Daten und Annahmen erläutert.

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Optimierung für drei unterschiedliche Entwicklungsstufen der Elektromobilität (10%, 50% und 100% Elektrofahrzeuganteil) präsentiert und diskutiert. Insbesondere wird hier auf den Einfluss der unterschiedlichen Wochentage und Bevölkerungsdichten eingegangen.

### 1.3. Aufbau der Arbeit

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse verschiedener Sensitivitätsanalysen vorgestellt. Dabei wird der Einfluss folgender Parameter untersucht und diskutiert:

- Technologische Entwicklung der Effizienz der Elektrofahrzeuge (Variation des spezifischen Energieverbrauchs)
- Technologische Entwicklung der Batteriekapazität der Elektrofahrzeuge
- Technologische Entwicklung der öffentlichen Ladesäulen (Variation der Ladeleistung)

Abschließend werden in Kapitel 6 Schlussfolgerungen anhand der präsentierten Ergebnisse getroffen sowie ein Ausblick auf noch offene Fragestellungen gegeben.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 2. Aktueller Stand der Entwicklungen

Der Verkehrssektor gilt in Österreich als einer der größten Verursacher von Treibhausgasemissionen. Langfristig können diese Emissionen nur gesenkt werden, indem ein Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energiequellen angestrebt, und so eine Dekarbonisierung des Verkehrssektors erreicht wird. Damit steht außer Frage, dass Elektromobilität, insbesondere im Individualverkehr die Zukunftstechnologie sein wird.

Bereits in den letzten Jahren ist ein klarer Aufwärtstrend bei neu zugelassenen E-PKW's in Österreich zu beobachten. Laut Statistik Austria, betrug im April 2020 der Anteil der Elektrofahrzeuge an den Neuzulassungen 4,96%<sup>1</sup>[6][7]. Betrachtet man den gesamten PKW-Bestand in Österreich, entspricht das einem Anteil von 0,60% [6][8]. In absoluten Zahlen sind das 32 203 Elektrofahrzeuge, das bedeutet einen Zuwachs von zirka 55% gegenüber dem Jahr 2018 mit 20 831 zugelassenen Fahrzeugen (Stand 31.12.2018) [6]. Soll Österreich bis 2050 einen weitgehend klimaneutralen Verkehrssektor erreichen, ist in den folgenden Jahren von einem ähnlichen Wachstum auszugehen [9].

Um den damit einhergehenden erhöhten Ladebedarf zu decken, und die gewünschte Reichweite gewährleisten zu können, ist ein optimaler Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur unerlässlich. Laut Austriatech [7] gab es bis zum Ende des ersten Quartals 2020 in ganz Österreich 3 519 öffentlich zugängliche Normalladepunkte und 540 Schnellladepunkte. Als Normalladepunkt zählen dabei alle Ladesäulen mit einer maximalen Ladeleistung bis 22 kW, als Schnellladepunkte folglich welche mit einer maximalen Ladeleistung von über 22 kW. Bei Annahme einer gleichmäßigen Verteilung von Elektrofahrzeugen und Ladepunkten, ergibt sich in Österreich ein Anteil von 8 E-PKW's pro Ladepunkt<sup>1</sup>. Die Daten basieren auf einer Statistik von „e-tankstellenfinder“, einem Online-Service der KELAG<sup>2</sup>, das eine umfassende Übersicht über alle österreichweit vorhanden Stromtankstellen liefert [10].

Als weltweit führend im Hinblick auf Elektromobilität gilt Norwegen. Ende des Jahres 2018 lag dort der Anteil der batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge an den PKW-Neuzulassungen bei 30%, zählt man Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge hinzu steigt dieser Wert sogar auf 46% [11]. Mit insgesamt 12 371 Ladepunkten (Stand 2018), entfallen damit auf einen Ladepunkt ca. 13 batteriebetriebene Fahrzeuge [11]. Das wären also um 5 Fahrzeuge mehr als in

<sup>1</sup>betrachtet werden nur BEV (batteriebetriebene Fahrzeuge)

<sup>2</sup>Kärntner Elektrizitäts-Aktiengesellschaft

## 2. Aktueller Stand der Entwicklungen

Österreich. Direkte Vergleiche zwischen diesen beiden Ländern sind allerdings aufgrund großer struktureller Unterschiede mit Vorsicht aufzustellen. Beispielsweise basiert die norwegische Stromerzeugung nahezu vollständig auf Wasserkraft [12]. Für eine grobe Orientierung ist so ein Gegenüberstellung aber trotzdem nützlich.

Der oben genannt Vergleich ließe darauf schließen, dass in Österreich bereits ein sehr dichtes Netz an öffentlichen Ladepunkten vorhanden ist und eine mangelnde Infrastruktur somit nicht für den vergleichsweise relativ geringen EV-Anteil verantwortlich sein kann.

Die Frage nach den Faktoren, die Elektromobilität vorantreiben wird auch im „EV Outlook 2019“ [11] aufgegriffen. Laut Internationaler Energieagentur [11] stehen vor allem Wohlstand und staatliche Förderungen in Zusammenhang mit einer schnellen Durchdringung des Marktes. Ein entsprechend gut ausgebautes Ladestellennetz ist zwar auch von Bedeutung jedoch nicht der entscheidende Faktor.

Eine ähnliche Argumentation wird auch im Klima- und Energiefahrplan der Niederösterreichischen Landesregierung vorgebracht [13]. Dieser beinhaltet konkrete Strategien und Maßnahmen um die Ziele für eine saubere, erneuerbare und nachhaltige Energiezukunft Niederösterreichs umzusetzen. Dem Thema Elektromobilität wird darin ebenfalls ein großer Stellenwert beigemessen. Demnach soll ab 2030 jeder Fünfte PKW auf Niederösterreichs Straßen elektrisch unterwegs sein. Laut NÖ Landesregierung ist in diesem Zusammenhang die entsprechende Ladeinfrastruktur zwar unerlässlich, der Hauptgedanke dahinter liegt allerdings in einer Akzeptanzsteigerung für die Technologie und einem gewissen Sicherheitsaspekt. Der notwendige Versorgungsbedarf der Elektrofahrzeuge wird erst in zweiter Linie betrachtet [13]. Begründet wird das durch die Tatsache, dass derzeit rund 80 bis 90 Prozent aller Ladungen in Niederösterreich von zu Hause aus erfolgen [13]. Mit einer Adaptierung der gesetzlichen Regelungen soll in Zukunft auch der Zugang zu privatem Laden in Wohnhausanlagen erleichtert werden. Das könnte den Anteil der privaten Ladevorgänge nochmals erhöhen [13].

Ausgehend von dieser Argumentation, lässt sich darauf schließen, dass angesichts des zu erwartenden starken Zuwachses an Elektromobilität zwar eindeutig ein Ausbau der bereits vorhandenen Ladeinfrastruktur notwendig sein wird. Dabei spielt neben der konkreten Anzahl an Ladepunkten, aber vor allem ihre optimale geografische Platzierung eine entscheidende Rolle, um einerseits die erwünschte Reichweite gewährleisten zu können und andererseits ein Gefühl der „Ladesicherheit“ zu vermitteln.

## 2.1. Wissenschaftliche Publikationen

In der Literatur finden sich bereits einige wissenschaftliche Publikationen, die Methoden zur optimalen Platzierung von Ladestationen aufzeigen. Im Folgenden wird ein Überblick über die wichtigsten Arbeiten gegeben.

Lin et al. stellen ein *Flow Capturing Location Model* vor, auf Basis dessen die Ladeinfrastruktur modelliert wird [14]. Das Ziel besteht darin, den besten Standort für die Errichtung der Ladestationen zu finden, um die Abdeckung des Verkehrsflusses jederzeit zu maximieren. Das erfolgt unter der Einhaltung diverser Nebenbedingungen wie einer Beschränkung von Ladepunkten und Errichtungskosten, sowie einer, für die einzelnen Fahrzeuge, maximal akzeptabler Distanz zur nächsten Ladestation. Die Lösungsmethode des Modells basiert auf dem Partikel-Schwarm-Optimierungs-Algorithmus, welcher den Vorteil hat simpel und leicht anpassbar zu sein. Das Modell wird am Beispiel eines Fernverkehrsnetzes auf seine Wirksamkeit und Praktikabilität geprüft. Die optimale Anzahl an Ladestationen wird gefunden, indem versucht wird den Ladebedarf, bei gleichzeitig kleinst möglichen Errichtungskosten, so gut wie möglich abzudecken.

Eines anderen Ansatzes bedienen sich Hayajneh et al. [15]. Sie wenden ein zweistufiges Optimierungsverfahren für die Planung von Ladestationen für Elektrofahrzeuge an. In der ersten Stufe wird, mit Hilfe eines genetischen Algorithmus, der bestmögliche Standort für die Errichtung einer Ladestation in der Stadt Corpus Christi (Texas) ermittelt. Genetische Algorithmen sind zur Lösung komplexer Optimierungsprobleme gut geeignet. Sie bedienen sich Techniken, die durch natürliche Entwicklungen wie Vererbung oder Mutation inspiriert werden. Im beschriebenen Ansatz gilt als Ziel die Minimierung von Transportenergieverlusten. Darunter verstehen Hayajneh et al. jene Energie, die ein Elektrofahrzeug verliert um von seinem aktuellen Standort zu einer Ladestation zu kommen. Sie ist abhängig vom SoC (*state of charge*), der Entladerate und der Batteriekapazität des Fahrzeuges. In der zweiten Stufe wird ein lineares Optimierungsmodell angewendet, um für jede Ladestation die optimale Anzahl an Lademöglichkeiten zu ermitteln, damit der Ladebedarf jederzeit gedeckt ist.

Chen et. al wenden in ihren Methoden ebenfalls eine Form des genetischen Algorithmus an [16]. Zur Ermittlung des optimalen Ortes für potentielle Ladestationen wird ein Standortoptimierungsmodell entwickelt, welches unter Einhaltung diverser Nebenbedingungen (u.a. Beschränkung der Kapazität, Abdeckung, Bequemlichkeit), die Investitions- und Transportkosten minimiert. Im zweiten Schritt wird das Optimierungsmodell unter Zuhilfenahme eines genetischen Algorithmus gelöst.

Ein anderer Ansatz wird von Ahn et al. vorgestellt [17]. Es handelt sich um eine analytische Methode zur Schätzung der optimalen Dichte von Ladestationen für bestimmte städtische Gebiete. Dieser Ansatz wird als *ERDEC stations model* bezeichnet (*Estimating the*

## 2. Aktueller Stand der Entwicklungen

*Required Density of EV Charging*). Dabei unterteilen Ahn et al. das betrachtete Gebiet in einzelne Flächeneinheiten (Zellen) und bestimmen mit Hilfe des *ERDEC*-Modells für diese Zellen die optimale Dichte der Ladestationen bei gleichzeitig minimalen Gesamtkosten. Daraus wird die optimale *density map* für das betrachtete Gebiet erstellt. Das Modell wird für die Stadt Daejeon (Südkorea) anhand realer Taxi-Verkehrsdaten ausgewertet und geprüft.

Eine Methode, die ebenfalls anhand realer Bewegungsmuster von Taxis umgesetzt wird, wird von Asamer et al. präsentiert [18]. Die Basis des entwickelten Modells bilden reale Betriebsdaten von zirka 800 Taxis in Wien. Ziel ist eine Deckung des Ladebedarfs mit minimaler Anzahl an Ladesäulen, dabei werden bereits real vorhandene Schnellladestationen ebenfalls berücksichtigt. Die Vorgangsweise ist ähnlich, zu jener von Ahn et al. [17]. Die Stadt wird ebenfalls in eine bestimmte Anzahl von kleinen Flächeneinheiten (Zellen) unterteilt, und der Ladebedarf für jede dieser Zellen ermittelt. Ziel des Modells ist es jedenfalls bestimmte Gebiete zu finden, die gut geeignet für die Errichtung der Ladestationen wären. Die exakte Position der Ladepunkte steht dabei im Hintergrund und wird erst in einer Post-Optimierungsphase identifiziert.

### 2.2. Wissenschaftlicher Beitrag dieser Arbeit

Aufbauend auf den genannten Entwicklungen und Studien ist der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit vor allem die differenzierte Betrachtungsweise unterschiedlicher Ladevorgänge und Ladepräferenzen einzelner Fahrer. Im Vergleich zu den vorgestellten Publikationen, wird im Rahmen dieser Arbeit, zwischen privaten, gewerblichen und öffentlichen Ladevorgängen unterschieden. Wie bereits beschrieben erfolgt der Großteil aller Ladungen von zu Hause [13], das senkt den öffentlichen Ladebedarf erheblich und wird in der entwickelten Methode auch entsprechend modelliert. Ziel des Optimierungsmodells ist daher die minimale Anzahl an öffentlichen Ladestationen, die darüber hinaus optimal geografisch verteilt sind. Dies erfolgt bei gleichzeitiger Berücksichtigung unterschiedlichen Ladeverhaltens der Fahrer. Das entwickelte Modell wird dabei auf ein Gebiet in Niederösterreich (St. Pölten und Umgebung) angewendet. Hier erfolgt die Unterteilung der Region in Zellen analog zu [17] und [18], Basis bilden jedoch nicht reale Bewegungsmuster von Taxis, sondern Berufsfahrten, die auf Basis von Pendlerstatistiken modelliert werden. Darüber hinaus werden die Zellen in die Kategorien „Stadt“, „Industrie“, „kleine Gemeinde“ und „Land“ eingeteilt. Alle weiteren Klassifizierungen von Ladezugang, Ladepräferenz etc. erfolgen auf Basis dieser Kategorien.

## 3. Methode

### 3.1. Überblick

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein mathematisches Optimierungsmodell entwickelt, das die optimale Anzahl und Verteilung von öffentlichen Ladepunkten für den privaten Individualverkehr eines ländlichen Gebietes berechnet.

Vor der eigentlichen Optimierung, ist es notwendig eine umfassende Datengrundlage zu schaffen um ein aussagekräftiges Mobilitätsverhalten abbilden zu können. Das umfasst zum einen die geografische Festlegung des Gebietes, zum anderen müssen Fahrtmuster, die auf Basis statistischer Daten generiert werden, und die vorhandene Ladeinfrastruktur modelliert werden. Die einzelnen Schritte, die dazu notwendig sind, werden in Abbildung 3.1 aufgezeigt, und in den folgenden Kapiteln im Detail beschrieben.

Aufbauend auf den generierten Daten wird das lineare Optimierungsmodell in *Matlab R2019b* formuliert. Als Optimierer wird *Yalmip* und als Solver *Gurobi* verwendet.

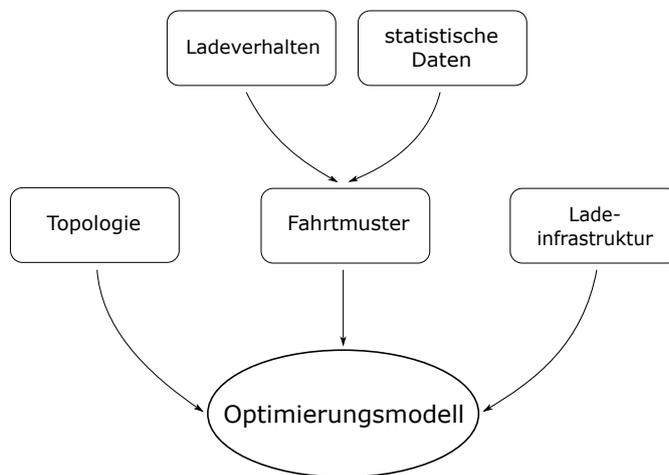


Abbildung 3.1.: Überblick der einzelnen Schritte zur Generierung der Datengrundlage für das Optimierungsmodell

### 3. Methode

## 3.2. Topologie des betrachteten Gebietes

Um das entwickelte Optimierungsmodell für ein reales Gebiet anwenden zu können, muss zunächst der geographische Bereich festgelegt werden. Da sich diese Arbeit auf den privaten Individualverkehr beschränkt und der Hauptfokus auf Berufspendlerverkehr gelegt wird, soll die betrachtete Region gut geeignet sein um ein Pendlerverhalten abzubilden.

Als Modellregion wird St. Pölten Stadt und das umliegende Gebiet gewählt, da es ein Gebiet ist, das die notwendigen Kriterien gut erfüllt.

St. Pölten repräsentiert ein relativ dicht besiedeltes, städtisches Gebiet. In der Umgebung befinden sich einige klassische Gewerbe- bzw. Industriegebiete, darüber hinaus liegen in der Region viele ländliche Gemeinden mit vergleichsweise geringer Bevölkerungsdichte. In dieser Region finden demzufolge viele Berufspendlerfahrten von den dünn besiedelten Gebieten in Richtung Stadt bzw. Stadtrand statt.

Die exakte geographische Festlegung erfolgt in den folgenden Schritten:

- Als erster Schritt wird um St. Pölten ein Kreis mit einem Radius von 25 km gelegt (siehe Abbildung 3.2)
- Im nächsten Schritt wird aus diesem Kreis ein Quadrat mit einer Seitenlänge von 50 km konstruiert. Da alle statistischen Daten, die den Berufspendlerverkehr betreffen, auf Gemeindeebene vorliegen (siehe Kapitel 3.3.1) wird in diesem Schritt auch festgelegt, welche Gemeinden in das Modellgebiet aufgenommen werden. Die betreffenden Gemeinden sind in Abbildung 3.3 grau markiert.
- Im letzten Schritt wird das Gebiet in 25 gleich große quadratische Zellen mit einer Größe von jeweils 10 km x 10 km unterteilt. Die im vorigen Schritt ausgewählten Gemeinden, werden nun jeweils einer der Zellen zugeordnet. Diese Einteilung kann Abbildung 3.4 entnommen werden.

### 3.2. Topologie des betrachteten Gebietes

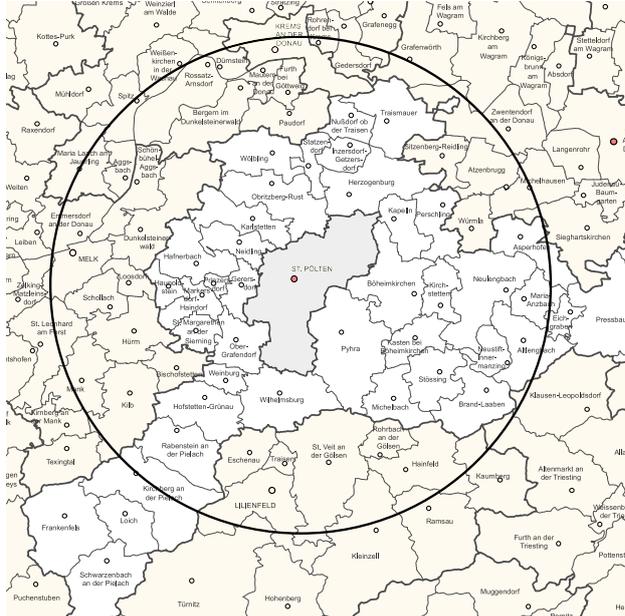


Abbildung 3.2.: Ausgewähltes Gebiet in einem Radius von 25km um St. Pölten (eigene Darstellung nach [19])

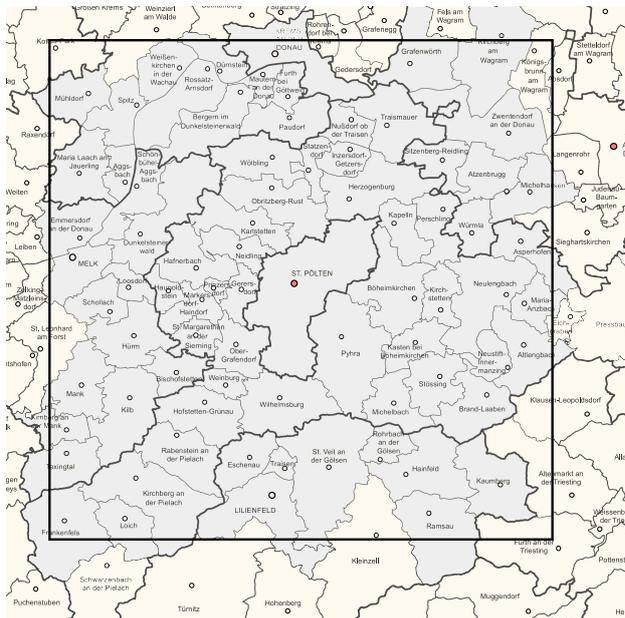


Abbildung 3.3.: Ausgewähltes 50x50km großes Gebiet (eigene Darstellung nach [19])

### 3. Methode

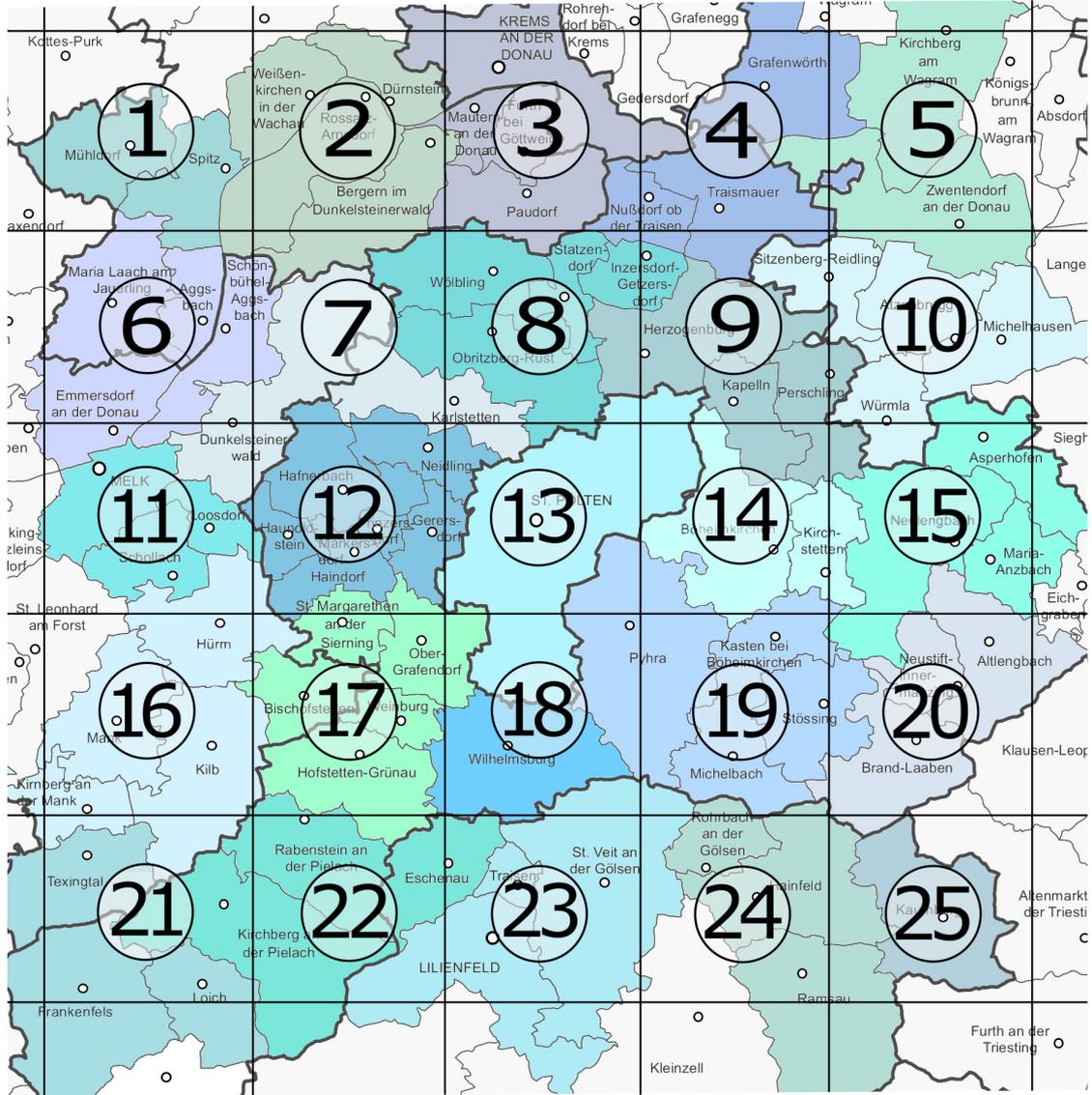


Abbildung 3.4.: Gruppierung der Gemeinden zu 25 gleich großen Zellen (eigene Darstellung nach [19])

### 3.2. Topologie des betrachteten Gebietes

Für die weitere Modellierung wird jeder der 25 Zellen, basierend auf ihrer Bevölkerungsdichte und Zahl der Einpendler [20], eine der vier folgenden Kategorien zugewiesen:

1. Land
2. Kleine Gemeinde
3. Industrie / Größere Gemeinde
4. Stadt

Die Einteilung erfolgt folgendermaßen: Als Land gilt eine Zelle mit einer Bevölkerungsdichte von unter 50 Einwohnern pro km<sup>2</sup> bzw. unter 1000 Einpendlern. Zellen mit einer Bevölkerungsdichte von 50-100 Einwohnern pro km<sup>2</sup> oder einer Anzahl von 1000 - 3000 Einpendlern klassifizieren sich als kleine Gemeinde. Als Industrie gilt eine Zelle dagegen, wenn ihre Einwohnerdichte über 500 Einwohner pro km<sup>2</sup> ausmacht oder sie über 3000 Einpendler verfügt. Die Kategorie „Stadt“, wird nur ein Mal für Zelle 13 (diese beinhaltet lediglich die Gemeinde St. Pölten) vergeben. St. Pölten hat eine Bevölkerungsdichte von knapp über 500 Einwohnern pro km<sup>2</sup> und über 35 000 Einpendler, hebt sich also diesbezüglich deutlich von allen anderen Zellen ab. Damit wird die klare Differenzierung zwischen der Stadt im Zentrum der Region und den ländlicheren Gebieten rundherum deutlich gemacht. Diese Zuteilung kann Abbildung 3.5 entnommen werden.

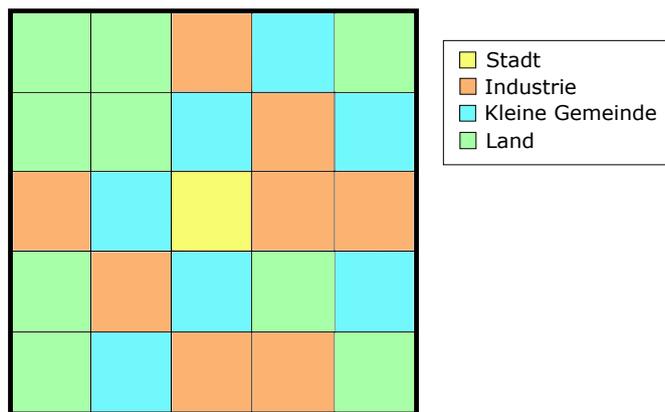


Abbildung 3.5.: Einteilung der Zellen in die vier Kategorien: Stadt, Industrie, Kleine Gemeinde, Land

Eine Auflistung der, zu den Zellen zugehörigen Gemeinden und der jeweiligen Kategorie kann Tabelle 3.1 entnommen werden.

### 3. Methode

Tabelle 3.1.: Zuordnung der Gemeinden zu den betrachteten Zellen

Zellen	zugeordnete Gemeinden	Kategorie
1	Mühdorf, Spitz	Land
2	Bergern im Dunkelsteinerwald, Dürnstein, Rossatz-Arnsdorf, Weißenkirchen in der Wachau	Land
3	Furth bei Göttweig, Krems an der Donau, Mautern an der Donau, Paudorf	Industrie
4	Grafenwörth, Nußdorf ob der Traisen, Traismauer	Kleine Gemeinde
5	Kirchberg am Wagram, Zwentendorf an der Donau	Land
6	Aggsbach, Emmerdsorf an der Donau, Maria Laach am Jauerling, Schönbühel-Aggsbach	Land
7	Dunkelsteinerwald, Karlstetten	Land
8	Inzersdorf-Getzersdorf, Obritzberg-Rust, Statzendorf, Wölbling	Kleine Gemeinde
9	Herzogenburg, Kapelln, Perschling	Industrie
10	Atzenbrugg, Michelhausen, Sitzenberg-Reidling, Würmla	Kleine Gemeinde
11	Loosdorf, Melk, Schollach	Industrie
12	Gerersdorf, Hafnerbach, Haunoldstein, Markersdorf-Haindorf, Neidling, Prinzersdorf	Kleine Gemeinde
13	St. Pölten	Stadt
14	Böheimkirchen, Kirchstetten	Industrie
15	Asperhofen, Maria-Anzbach, Neulengbach	Industrie
16	Hürm, Kilb, Kirnberg an der Mank, Mank	Land
17	Bischofstetten, Hofstetten-Grünau, Ober-Grafendorf, St. Margarethen an der Sierning, Weinburg	Industrie
18	Wilhelmsburg	Kleine Gemeinde
19	Kasten bei Böheimkirchen, Michelbach, Pyhra, Stössing	Land
20	Altlingbach, Brand-Laaben, Neustift-Innermanzing	Kleine Gemeinde
21	Frankenfels, Loich, Texingtal	Land
22	Eschenau, Kirchberg an der Pielach, Rabenstein an der Pielach	Kleine Gemeinde
23	Lilienfeld, St. Veit an der Gölsen, Traisen	Industrie
24	Hainfeld, Ramsau, Rohrbach an der Gölsen	Industrie
25	Kaumberg	Land

### 3.2. Topologie des betrachteten Gebietes

Für die spätere Optimierung werden auch die Distanzen, der in Kapitel 3.3 festgelegten Fahrten, benötigt. Straßennetze werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, weswegen die Annahme getroffen wird, dass die Wege immer vom Mittelpunkt einer Zelle zum Mittelpunkt der nächsten zurück gelegt werden. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten der Fahrt:

- Gerade von einer Zelle zur anderen, dabei wird die Distanz  $d_g = 10$  km zurück gelegt
- Quer zwischen zwei diagonal gelegenen Zellen, dabei wird die Distanz  $d_q = \sqrt{d_g^2 + d_g^2} = 14.14$  km zurück gelegt

Dabei wird für alle Fahrten immer der kürzeste mögliche Weg gewählt. Zur Veranschaulichung werden in Abbildung 3.6 drei Beispiele skizziert.

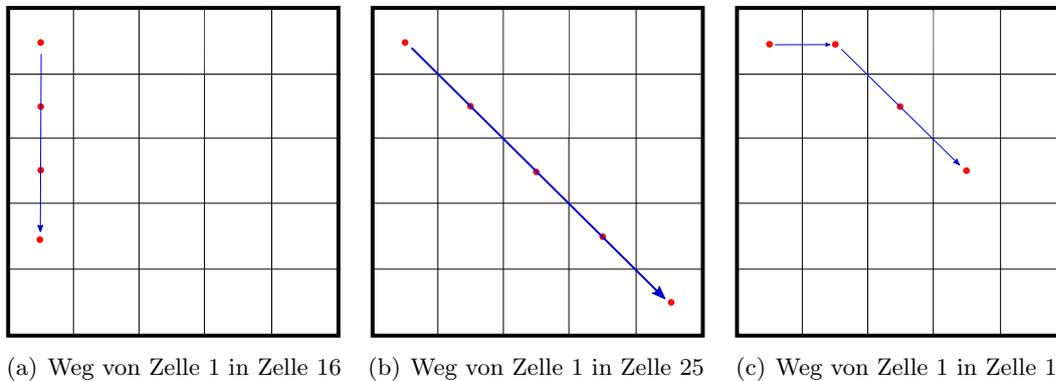


Abbildung 3.6.: Beispiele für zurückgelegte Wege

Im ersten Beispiel (Abbildung 3.6 a) wird von Zelle 1 in Zelle 16 gefahren, da diese Zellen untereinander liegen ist der kürzeste Weg die direkte Fahrt, dabei wird die Distanz  $d = 3 \cdot d_g = 30$  km zurück gelegt. Das zweite Beispiel (Abbildung 3.6 b) zeigt eine Fahrt von Zelle 1 in Zelle 25, in diesem Fall ist der kürzeste Weg eine Diagonale. Die zurückgelegte Distanz beträgt somit  $d = 4 \cdot d_q = 56.57$  km. Das dritte Beispiel (Abbildung 3.6 c) zeigt eine Fahrt zwischen zwei Zellen, die nicht gerade oder diagonal zueinander liegen. In diesem Fall wird die kürzeste Kombination der möglichen Wege gewählt, für das konkrete Beispiel wäre das  $d = d_g + 2 \cdot d_q = 38.28$  km. Die Festlegung aller weiteren Distanzen zwischen den Zellen erfolgt analog.

### 3. Methode

## 3.3. Modellierung der Fahrtmuster

Die wichtigste Datengrundlage des Optimierungsmodells stellt der Verkehrsfluss innerhalb des Modellgebietes dar. Da das Gebiet als in sich geschlossen betrachtet wird, werden nur Verkehrsflüsse herangezogen, die zwischen den einzelnen, in Kapitel 3.2 definierten Zellen statt finden. Sämtlicher Verkehr, der von außerhalb in das Modellgebiet hinein oder hinausführt, wird nicht berücksichtigt. Darüber hinaus werden auch alle Bewegungen, die innerhalb einer Zelle stattfinden vernachlässigt.

Das Modell optimiert die Verteilung öffentlicher Ladeinfrastruktur für den privaten Individualverkehr. Aus diesem Grund werden auch nur Fahrten betrachtet, die Privatpersonen zuzurechnen sind. Dieses Verkehrsaufkommen kann grob in Berufsverkehr und Privatverkehr unterteilt werden. Berufsfahrten finden im betrachteten Modell nur an Werktagen statt und haben als Zweck die Fahrt zum Arbeitsplatz bzw. retour. Im Unterschied dazu gibt es für private Fahrten weitaus mehr mögliche Fahrtzwecke.

Da solche Verkehrsdaten in vollständiger Form nicht verfügbar sind, ist es notwendig Mobilitätsmuster zu erstellen, auf dessen Basis die gesamten Fahrten der Bevölkerung der Modellregion möglichst realitätsgetreu abgebildet werden.

Für die Generierung der Fahrtmuster wird ein Tag in sechs Zeitintervalle mit einer Länge von jeweils vier Stunden unterteilt (Tabelle 3.2). Innerhalb eines Zeitabschnitts wird ein ähnliches Verkehrsaufkommen mit den selben Wegzwecken vorausgesetzt.

Tabelle 3.2.: Zeitintervalle für die Generierung der Fahrtmuster

Zeitintervall	Zeitspanne
$t_1$	05:00 - 09:00
$t_2$	09:00 - 13:00
$t_3$	13:00 - 17:00
$t_4$	17:00 - 21:00
$t_5$	21:00 - 01:00
$t_6$	01:00 - 05:00

Zusätzlich wird festgelegt, dass sich alle Fahrzeuge zum Zeitpunkt  $t_1$  und zum Zeitpunkt  $t_6$  in ihrer Wohnzelle befinden.

Generell werden unterschiedliche Mobilitätsmuster für Werktage und das Wochenende, wobei hier Samstag und Sonntag differenziert betrachtet werden, erstellt.

#### Werktage

Es wird angenommen, dass das Verkehrsverhalten an jedem Werktag, also von Montag bis Freitag identisch ist.

Das Hauptverkehrsaufkommen an einem Werktag wird gebildet durch

- Berufsverkehr
- Einkaufsfahrten Berufstätiger nach der Arbeitszeit
- Einkaufsfahrten nicht berufstätiger Personen über den ganzen Tag verteilt

Ausgangspunkt für die Modellierung der Fahrtmuster bildet die Gesamtbevölkerung des Modellgebietes. Durch die Erwerbsquote [21] lässt sich die Anzahl Berufstätiger und Nichtberufstätiger ermitteln.

Als Basis für die Modellierung der Fahrten Berufstätiger werden statistische Daten zu Pendlerströmen zwischen den Zellen des Modellgebietes (siehe Kapitel 3.3.1) herangezogen.

Laut einer Mobilitätserhebung der Niederösterreichischen Landesregierung aus dem Jahr 2013/2014 [22], werden rund 60% der Arbeitsplatzwege als MIV<sup>1</sup>-Lenker zurückgelegt. Dieser Wert wird unter Vernachlässigung von Moped- und Motorradfahrten, und der Annahme eines über die nächsten Jahre hinweg stetig gleich bleibenden Prozentsatzes, für die Generierung der Berufsfahrten herangezogen. Damit erhält man den Anteil der Erwerbsspendler des Modellgebiets, die mit dem PKW pendeln. Dabei werden nun drei Szenarien mit unterschiedlichen Anteilen an Elektrofahrzeugen (siehe Kapitel 3.5.3) betrachtet. Je nach Szenario lässt sich so die Anzahl an Erwerbsspendlern, die innerhalb eines Modellgebiets mit einem Elektrofahrzeug pendeln, ermitteln.

Für Fahrten nach der Arbeit gibt es die folgenden Optionen

- direkte Rückfahrt in die Wohnzelle, und keine weitere Fahrt wird unternommen
- direkte Rückfahrt in die Wohnzelle, danach wird noch eine weitere Fahrt unternommen
- Rückfahrt in die Wohnzelle nachdem ein Zwischenstopp in einer anderen Zelle eingelegt wurde

---

<sup>1</sup>motorisierter Individualverkehr [22]

### 3. Methode

Zusätzlich zur Annahme, dass sich alle Fahrzeuge zum Zeitpunkt  $t_1$  in ihrer Wohnzelle befinden, werden unterschiedlich lange Aufenthaltszeiten in der Arbeitszelle (entspricht der Arbeitszeitdauer) festgelegt:

- $t_2$
- $t_2$  und  $t_3$
- $t_2, t_3$  und  $t_4$

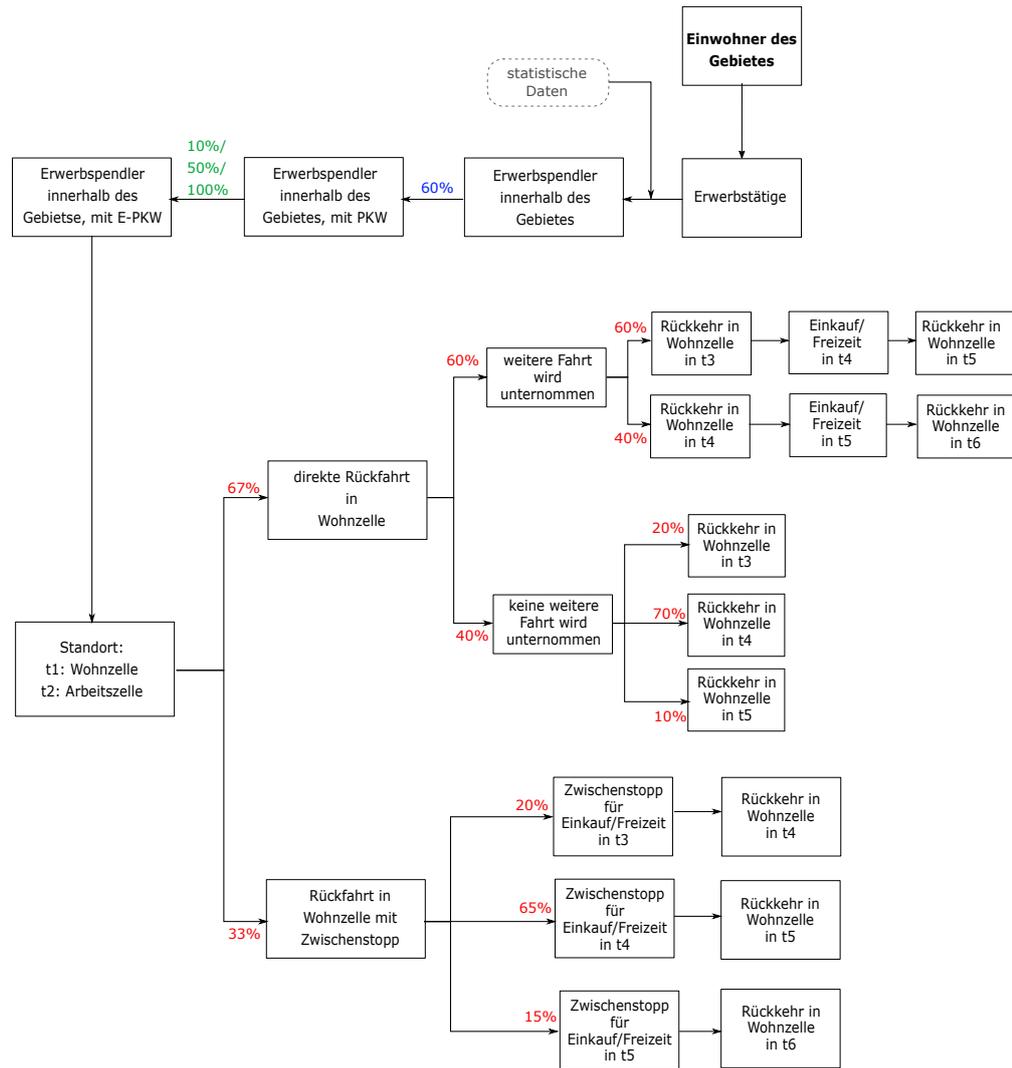


Abbildung 3.7.: Festlegung der Fahrten für Pendler

### 3.3. Modellierung der Fahrtmuster

Die Aufenthaltsdauer in einer Zelle zum Zweck des Einkaufens ist immer auf ein Zeitintervall beschränkt. Die Rückkehr in die Wohnzelle erfolgt dann immer im darauffolgenden Zeitintervall. Die genaue Vorgangsweise zur Modellierung der Fahrten Berufstätiger wird grafisch in Abbildung 3.7 dargestellt. Die in rot und blau eingezeichneten Prozentsätze in Abbildung 3.7 basieren auf Daten der Mobilitätserhebung der NÖ Landesregierung [22] und wurden für das Modell angepasst. Die grünen Prozentzahlen wurden selbst festgelegt.

Die Festlegung der Zelle, in die nach der Arbeit zum Einkaufszweck gefahren wird, erfolgt auf Basis der Klassifizierung der Zellen entsprechend ihrer Einkaufsmöglichkeiten. Diese Klassifizierung erfolgt basierend auf der, in Kapitel 3.3.1 näher erläuterten, Gebäudestatistik von Statistik Austria [20] und ist in Abbildung 3.10 ersichtlich.

Wird sofort nach der Arbeit ein Zwischenstopp eingelegt, erfolgt dieser in einer der drei Zellen mit den meisten Einkaufsmöglichkeiten, die zwischen Wohn- und Arbeitszelle liegen. Wird vorher noch an den Wohnort zurückgekehrt, so erfolgt eine anschließende Einkaufsfahrt in eine von drei Nachbarzellen mit den meisten Einkaufsmöglichkeiten.

Die Modellierung der Fahrten nicht arbeitender Personen erfolgt ähnlich. Die Anzahl der mobilen Personen wird anhand Daten der NÖ Mobilitätserhebung [22] zu Führerscheinbesitz, PKW-Besitz, Mobilitätsverhalten und Verkehrsmittelwahl ermittelt. Die genaue Vorgehensweise kann Abbildung 3.8 entnommen werden.

#### Wochenende

Die Modellierung für Samstag erfolgt analog zu den Einkaufsfahrten an Werktagen.

Sonntag wird anders behandelt. Hauptverkehrsaufkommen am Sonntag bilden Freizeitfahrten. Die Festlegung der Zellen, in die zum Freizeitweck gefahren wird, erfolgt auf Basis der Klassifizierung der Zellen entsprechend ihrer Freizeitmöglichkeiten. Diese Klassifizierung erfolgt basierend auf der, in Kapitel 3.3.1 näher erläuterten, Statistik zu Freizeiteinrichtungen der Statistik Austria [20] und ist in Abbildung 3.11 ersichtlich. Die genaue Vorgangsweise zur Modellierung der Fahrten kann Abbildung 3.9 entnommen werden.

### 3. Methode

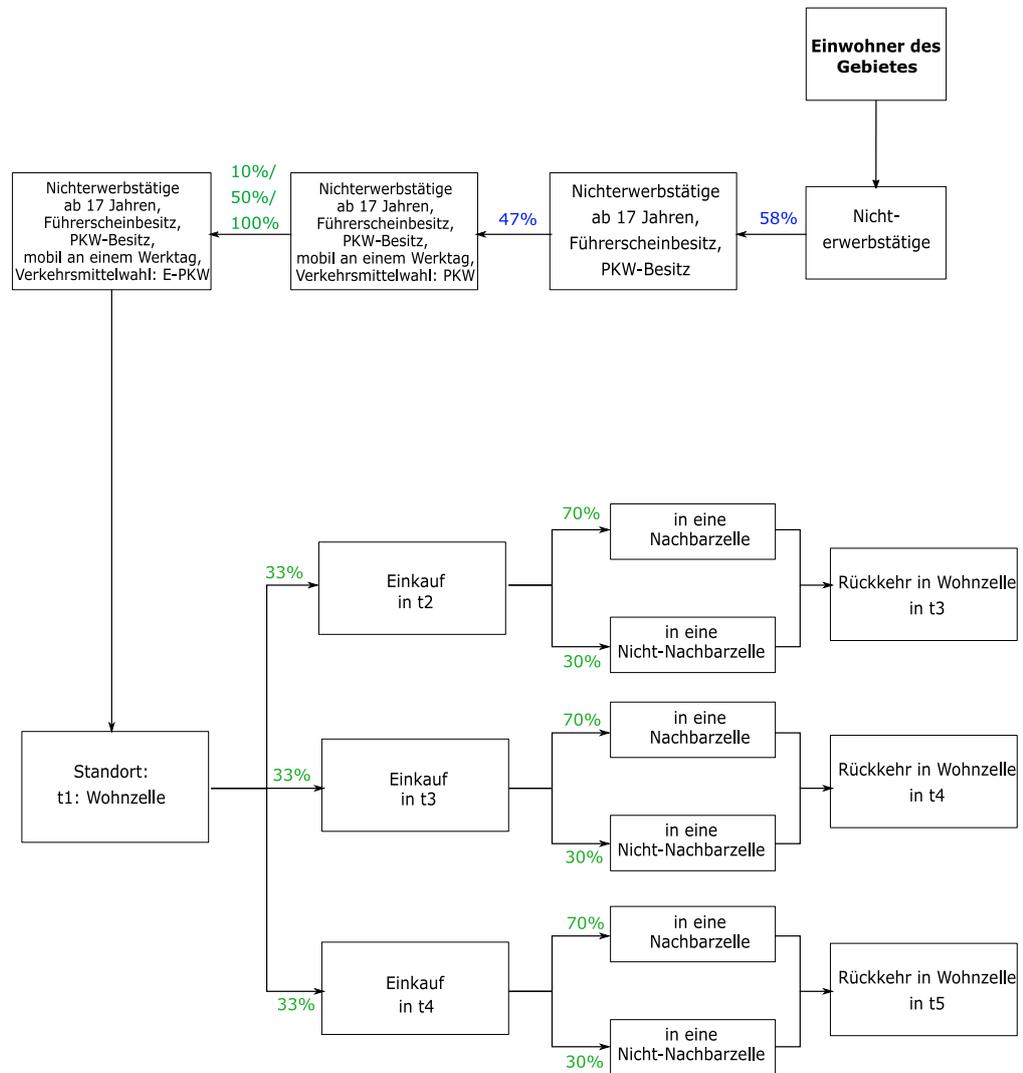


Abbildung 3.8.: Festlegung der Freizeitfahren für einen Werktag

### 3.3. Modellierung der Fahrtmuster

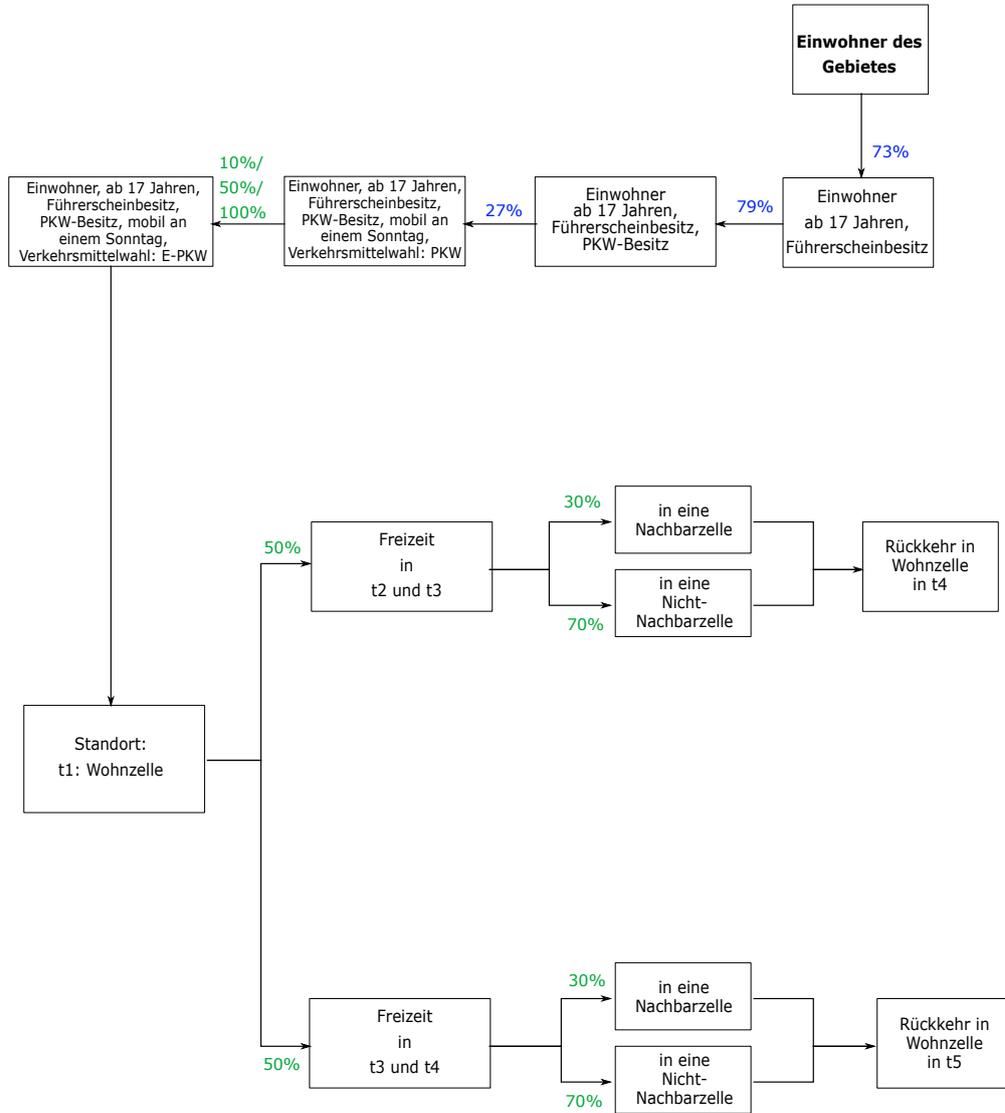


Abbildung 3.9.: Festlegung der Freizeitfahrten für einen Sonntag

### 3. Methode

#### 3.3.1. Statistische Daten

Die Basis für die Modellierung des Verkehrsflusses bilden Daten der Statistik Austria [20].

Die Berufsfahrten bauen auf einer, auf Gemeindeebene vorliegenden Erwerbsstatistik [20] auf, in der für jede Gemeinde unter anderem folgende Pendlerströme erfasst werden:

- Gesamtzahl der Auspendler/Einpendler in/von einer anderen Gemeinde desselben politischen Bezirks
  - Für Pendlerströme mit über 20 Erwerbstätigen aufgespalten auf einzelne Gemeinden
- Gesamtzahl der Auspendler/Einpendler in/von einem anderen politischen Bezirk desselben Bundeslandes
  - Für Pendlerströme mit über 20 Erwerbstätigen aufgespalten auf einzelne Gemeinden

Im nächsten Schritt wird für jede Gemeinde des Modellgebietes eine Ein- und Auspendler-Bilanz erstellt um so Pendlerströme mit weniger als 20 Erwerbstätigen hochrechnen zu können. Diese, auf Gemeindeebene vorliegenden Daten werden dann auf die in Kapitel 3.2 definierte Zellebene aggregiert. Auf diese Art werden für alle Zellen der Modellregion Pendlerströme in alle anderen Zellen innerhalb des Gebietes generiert.

Für Einkaufs- und Freizeitfahrten liegen keine ähnlichen Statistiken zum Fahrverhalten vor, weswegen für die Modellierung dieser Fahrten ein anderer Ansatz gewählt wird. Die einzelnen Zellen des Modellgebietes werden nach der Anzahl ihrer Einkaufs- bzw. Freizeitmöglichkeiten klassifiziert (siehe Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11). Zellen mit einer höheren Bewertung, werden auch wahrscheinlicher für eine Einkaufs- bzw. Freizeitfahrt befahren. Die Kategorisierung der Zellen erfolgt aufbauend auf einer, von Statistik Austria [20] auf Gemeindeebene vorliegenden Statistik zum Wohnungs- und Gebäudebestand. Diese wird wieder auf die in Kapitel 3.2 definierte Zellebene aggregiert und angepasst.

### 3.3. Modellierung der Fahrtmuster

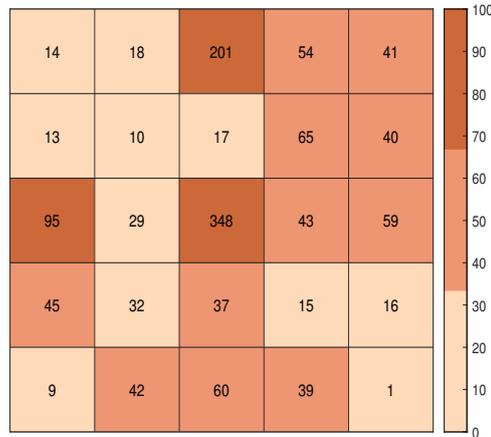


Abbildung 3.10.: Klassifizierung der Zellen nach Anzahl an Einkaufsgebäuden/Einkaufsmöglichkeiten

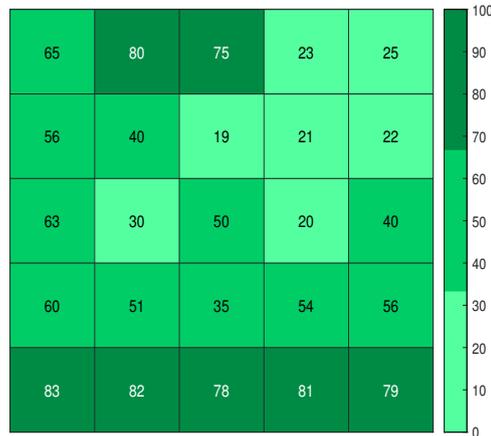


Abbildung 3.11.: Klassifizierung der Zellen nach Anzahl an Gebäuden für Freizeitwecke bzw. Freizeiteinrichtungen

#### 3.3.2. Ladeverhalten

Um ein aussagekräftiges Mobilitätsverhalten abbilden zu können, ist es notwendig, neben den konkreten Fahrtmustern auch das Ladeverhalten der einzelnen Verkehrsteilnehmer zu kennen. In dieser Arbeit wird versucht ein, von der Besiedlungsdichte abhängiges Ladeverhalten abzubilden. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, wird den einzelnen Zellen, unter anderem abhängig von ihrer Bevölkerungsdichte eine von vier Kategorien (Land, Kleingemeinde, Industrie, Stadt) zugeordnet (siehe Abbildung 3.5). Darüber hinaus wird im Optimierungsmodell zwischen drei Möglichkeiten des Ladens differenziert:

### 3. Methode

- privat
- am Arbeitsplatz
- an öffentlichen Ladestationen

Basierend darauf wird das Nutzverhalten beim Laden von Elektrofahrzeugen des privaten Individualverkehrs von den folgenden Faktoren bestimmt:

- Kategorie der Wohnzelle
- Kategorie der Arbeitszelle
- Zweck der Fahrt(Arbeit/Privat)

Abhängig vom Fahrtzweck werden nun unterschiedliche Ladetypen festgelegt, die sich durch die folgenden vier Merkmale unterscheiden:

- $SoC^{init}$ , der state of charge, den ein Elektrofahrzeug zum Zeitpunkt  $t_1$  aufweist.
- $P^{home}$ , eine Präferenz das Fahrzeug zu Hause zu laden
- $P^{public}$ , eine Präferenz das Fahrzeug öffentlich zu laden
- $P^{work}$ , eine Präferenz das Fahrzeug am Arbeitsplatz zu laden

Die Präferenz des Ladens trifft noch keine Aussage darüber ob tatsächlich eine Lademöglichkeit an eben diesem Ort vorhanden ist. Diese Tatsache wird durch den Zugang zur Ladeinfrastruktur bestimmt und in Kapitel 3.4 näher erläutert.

#### **Berufsfahrten**

Für den Fahrtzweck „Arbeit“ werden die in Tabelle 3.3 angeführten, fünf unterschiedlichen Ladetypen definiert.

Typ A zeichnet sich beispielsweise durch eine hohe Präferenz des Ladens zu Hause aus, öffentliche Ladevorgänge sollen soweit wie möglich vermieden werden. Das Fahrzeug wird üblicherweise über Nacht geladen und weist am Anfang des Tages einen vollen Tank auf. Im Gegensatz dazu, hat der Ladetyp E eine sehr hohe Präferenz sein Fahrzeug öffentlich zu Laden, und möchte auf private Ladevorgänge verzichten. Die weiteren Ladetypen sind Mischformen aus diesen zwei Extremen.

Unabhängig davon werden für Berufsfahrten 16 Pendlertypen, in Abhängigkeit von ihrer Wohn- und Arbeitszelle, wie in Tabelle 3.4 dargestellt, generiert. Typ 16, also ein Pendler mit Wohn- und Arbeitszelle der Kategorie Stadt kommt jedoch im entwickelten Modell nicht vor, da diese Kategorie nur für eine einzige Zelle (Zelle 13) vergeben wurde und Bewegungen innerhalb einer Zelle im Modell nicht dargestellt werden. Jede Arbeitsfahrt innerhalb der Modellregion kann somit einer der 16 Pendlerkategorien zugeordnet werden.

### 3.3. Modellierung der Fahrtmuster

Tabelle 3.3.: Ladetypen für Arbeitsfahrten

	SoC <sub>init</sub>	P <sub>home</sub>	P <sub>work</sub>	P <sub>public</sub>
Typ A	100%	0.70	0.30	0.00
Typ B	60%	0.30	0.70	0.00
Typ C	60%	0.20	0.50	0.30
Typ D	50%	0.30	0.00	0.70
Typ E	50%	0.00	0.20	0.80

Tabelle 3.4.: Festlegung der unterschiedlichen Pendlerkategorien

		Arbeitszelle			
		Land	kleine Gemeinde	Industrie	Stadt
Wohnzelle	Land	1	2	3	4
	kleine Gemeinde	5	6	7	8
	Industrie	9	10	11	12
	Stadt	13	14	15	16

Im nächsten Schritt werden jeder Pendlerkategorie (1-16), jeweils zwei Ladetypen (A-E) mit unterschiedlichem Verteilungsschlüssel zugeordnet. Diese Aufteilung kann Tabelle 3.5 entnommen werden.

Zur besseren Veranschaulichung wird diese Aufteilung für einen konkreten Fall in Abbildung 3.12 grafisch dargestellt. In diesem Beispiel handelt es sich um eine Arbeitsfahrt von Zelle 22 (kleine Gemeinde) in Zelle 13 (Stadt), diese Fahrt entspricht also laut Tabelle 3.4 der Pendlerkategorie 8. Gibt es insgesamt 100 E-PKW-Besitzer, die an einem Werktag solch eine Arbeitsfahrt zurück legen, werden entsprechend der Annahmen in Tabelle 3.5, 60 Personen dem Ladetyp A, und 40 dem Ladetyp D angehören. Die jeweiligen Merkmale sind in der Grafik angeführt und wurden aus Tabelle 3.3 entnommen.

### 3. Methode

Tabelle 3.5.: Verteilung der Ladetypen auf die Pendlerkategorien

	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D	Typ E
Pendlerkategorie 1	0.80	0.00	0.00	0.20	0.00
Pendlerkategorie 2	0.80	0.00	0.00	0.00	0.20
Pendlerkategorie 3	0.00	0.70	0.30	0.00	0.00
Pendlerkategorie 4	0.70	0.00	0.00	0.30	0.00
Pendlerkategorie 5	0.80	0.20	0.00	0.00	0.00
Pendlerkategorie 6	0.70	0.00	0.00	0.30	0.00
Pendlerkategorie 7	0.00	0.60	0.40	0.00	0.00
Pendlerkategorie 8	0.60	0.00	0.00	0.40	0.00
Pendlerkategorie 9	0.60	0.00	0.00	0.40	0.00
Pendlerkategorie 10	0.60	0.00	0.00	0.40	0.00
Pendlerkategorie 11	0.00	0.00	0.70	0.00	0.30
Pendlerkategorie 12	0.30	0.00	0.00	0.70	0.00
Pendlerkategorie 13	0.40	0.00	0.00	0.60	0.00
Pendlerkategorie 14	0.00	0.00	0.00	0.70	0.30
Pendlerkategorie 15	0.00	0.00	0.50	0.00	0.50
Pendlerkategorie 16	0.00	0.00	0.00	0.50	0.50

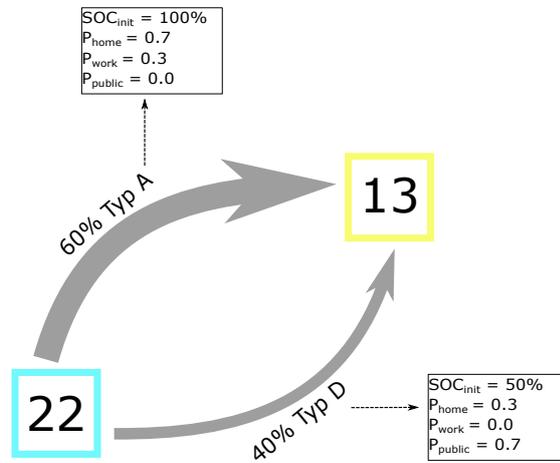


Abbildung 3.12.: Beispielhafte Darstellung für die Zuordnung der Ladetypen den Pendlerkategorien für Pendler der Pendlerkategorie 8

### Private Fahrten

Analog zu den Arbeitsfahrten werden für den Zweck einer privaten Fahrt, das sind in dieser Arbeit Einkaufs- und Freizeitfahrten, die in Tabelle 3.6 angeführten Ladetypen definiert.

Tabelle 3.6.: Ladetypen für Privatfahrten

	$SOC_{init}$	$P_{home}$	$P_{public}$
Typ FA	100%	1.00	0.00
Typ FB	50%	0.00	1.00
Typ FC	60%	0.50	0.50

In diesem Fall erfolgt keine Einteilung ähnlich den Pendlerkategorien, die Klassifizierung der Fahrten findet nur anhand der Kategorie der Wohnzelle (entsprechend Abbildung 3.5) statt. Jeder Kategorie werden jeweils zwei Ladetypen (FA-FC) mit unterschiedlichem Verteilungsschlüssel zugeordnet. Diese Aufteilung kann Tabelle 3.7 entnommen werden.

Tabelle 3.7.: Verteilung der Ladetypen auf Nicht-Pendler, entsprechend der Kategorie ihrer Wohnzelle

Kategorie der Wohnzelle	Typ FA	Typ FB	Typ FC
Land	0.95	0.00	0.05
kleine Gemeinde	0.80	0.15	0.05
Industrie	0.80	0.10	0.10
Stadt	0.30	0.30	0.40

## 3.4. Modellierung der Ladeinfrastruktur

Wie bereits in Kapitel 3.3.2 erwähnt, werden im Modell drei mögliche Optionen für das Laden des Elektrofahrzeuges definiert:

- privat am eigenen Stellplatz/ in der eigenen Garage
- am Arbeitsplatz
- an öffentlichen Ladestationen

Es wird festgelegt, dass alle Fahrzeuge im Modellgebiet Zugang zu öffentlicher Ladeinfrastruktur haben. Die Möglichkeit des privaten Ladens und des Ladens am Arbeitsplatz

### 3. Methode

ist von mehreren Faktoren abhängig. Der private Ladezugang ist klarerweise nur in der Wohnzelle gegeben. Der Anteil der Fahrzeuge, die zu Hause geladen werden können ist abhängig von der Kategorie der Wohnzelle und in Tabelle 3.8 ersichtlich. Laut dem niederösterreichischen Klima- und Energiefahrplan [13] erfolgen rund 80 bis 90 Prozent aller Ladevorgänge von zu Hause aus. Dabei sind bei rund 70% der niederösterreichischen Haushalte die Voraussetzungen für das private Laden gegeben [13]. Diese Werte wurden herangezogen und für die unterschiedlichen Zellkategorien (siehe Abbildung 3.5) angepasst. Grundsätzlich wird von der Annahme ausgegangen, dass der private Ladezugang mit steigender Bevölkerungsdichte (ausgedrückt durch die Kategorie der Zellen) abnimmt. Begründet wird das durch die Unterschiede in den Wohnverhältnissen privater Haushalte. So leben in stärker besiedelten Gebieten auch mehr Menschen in Mehrfamilien- bzw. Mehrparteienhäusern, in denen, zumindest aus heutiger Sicht, schlechtere Voraussetzungen für private Ladeinfrastruktur gegeben sind.

Mit den in dieser Arbeit getroffenen Annahmen (siehe Tabelle 3.8), haben nun insgesamt rund 80% der Elektrofahrzeuge im Modellgebiet einen privaten Ladezugang.

Tabelle 3.8.: Anteil der Elektrofahrzeuge mit privater Lademöglichkeit in Abhängigkeit von der Kategorie der Wohnzelle

Kategorie der Wohnzelle	Anteil der Fahrzeuge mit privatem Ladezugang
Land	95%
kleine Gemeinde	85%
Industrie	75%
Stadt	50%

Das Laden am Arbeitsplatz ist ebenfalls nur in der jeweiligen Arbeitszelle möglich, mit der zusätzlichen Beschränkung auf Werkzeuge und den Zeitraum in dem sich das Fahrzeug am Arbeitsplatz befindet. Wird zum Beispiel Samstags eine Einkaufsfahrt in die, für das Auto als Arbeitszelle definierte Zelle unternommen, ist in diesem Fall keine Lademöglichkeit am Arbeitsplatz vorhanden. Genauso wie im Falle des privaten Ladens, ist der Anteil der Fahrzeuge, die am Arbeitsplatz geladen werden können von der Zellkategorie, in diesem Fall jener der Arbeitszelle abhängig. Der Anteil der Autos mit gewerblicher Lademöglichkeit, wird für Zellen die als Industriegebiete deklariert werden, am größten angenommen. Das sind Gebiete, in denen Betriebe mit relativ großen Parkplätzen angesiedelt sind, theoretisch also eine Vielzahl an Ladeplätzen angeboten werden kann. Demgegenüber werden die gewerblichen Lademöglichkeiten in einem städtischen Gebiet als beschränkter angenommen.

### 3.5. Optimierungsmodell

Die gewählten Werte für alle vier Kategorien sind in Tabelle 3.9 angeführt. Insgesamt haben rund 35% aller Berufspendler einen Ladezugang am Arbeitsplatz.

Tabelle 3.9.: Anteil der Elektrofahrzeuge mit Lademöglichkeit am Arbeitsplatz abhängig von der Kategorie der Wohnzelle

Kategorie der Arbeitszelle	Anteil der Fahrzeuge mit Ladezugang am Arbeitsplatz
Land	20%
kleine Gemeinde	30%
Industrie	55%
Stadt	10%

### 3.5. Optimierungsmodell

Beim entwickelten Modell handelt es sich um ein lineares Optimierungsmodell, welches in *Matlab R2019b* formuliert und mit Hilfe des Optimierers *Yalmip* und des Solvers *Gurobi* gelöst wurde. Im nächsten Abschnitt wird die mathematische Formulierung des Modells skizziert (3.5.1) und unter Zuhilfenahme eines Ablaufdiagramms (3.5.2) anschaulich beschrieben. Die zur Lösung des Modells, notwendigen Daten und Annahmen werden in Abschnitt 3.5.3 angeführt. Die in der mathematischen Beschreibung verwendeten Variablen sind in Tabelle 3.10 ersichtlich.

### 3. Methode

Tabelle 3.10.: Nomenklatur des Optimierungsmodells

Name	Bezeichnung
$bin_{i,t,z}^{charge,home}$	binäre Variable, privater Ladezugang
$bin_{i,t,z}^{charge,public}$	binäre Variable, öffentlicher Ladezugang
$bin_{i,t,z}^{charge,work}$	binäre Variable, Ladezugang am Arbeitsplatz
$c$	spezifischer Energieverbrauch eines Elektrofahrzeuges
$d_{i,t}$	Distanz, die Auto $i$ zum Zeitpunkt $t$ zurück legt
$E_{i,t,z}^{home}$	Energiemenge, die von Auto $i$ zum Zeitpunkt $t$ , in der Zelle $z$ zu Hause geladen wird
$E_{i,t,z}^{public}$	Energiemenge, die von Auto $i$ zum Zeitpunkt $t$ , in der Zelle $z$ öffentlich geladen wird
$E_{i,t,z}^{work}$	Energiemenge, die von Auto $i$ zum Zeitpunkt $t$ , in der Zelle $z$ am Arbeitsplatz geladen wird
$\hat{E}_z^{public}$	Maximum aller Zeiteinheiten der summierten, öffentlich geladenen Energiemenge für jede Zelle $z$
$h_{timeslot}$	Dauer eines Zeitintervalls
$N$	Gesamtzahl der Elektrofahrzeuge
$\eta^{home}$	Wirkungsgrad der privaten Ladeinfrastruktur
$\eta^{public}$	Wirkungsgrad der öffentlichen Ladeinfrastruktur
$\eta^{work}$	Wirkungsgrad der gewerblichen Ladeinfrastruktur
$P^{all}$	Optimierungsvariable zur Berücksichtigung der Ladepräferenzen
$P_{i,t,z}^{home}$	Präferenz für privates Laden von Auto $i$ , zum Zeitpunkt $t$ , in Zelle $z$
$P_{i,t,z}^{public}$	Präferenz für öffentliches Laden von Auto $i$ , zum Zeitpunkt $t$ , in Zelle $z$
$P_{i,t,z}^{work}$	Präferenz für gewerbliches Laden von Auto $i$ , zum Zeitpunkt $t$ , in Zelle $z$
$power_{home,max}$	maximale private Ladeleistung pro Stunde
$power_{public,max}$	maximale öffentliche Ladeleistung pro Stunde
$power_{work,max}$	maximale gewerbliche Ladeleistung pro Stunde
$SoC_{i,t}^{in}$	Ladezustand der Batterie von Auto $i$ zu Beginn von Zeiteinheit $t$
$SoC_i^{init}$	Initial-Ladezustand der Batterie von Auto $i$ in Zeiteinheit $t_1$
$SoC^{min}$	Minimaler Ladezustand der Batterie eines Elektrofahrzeuges
$SoC^{max}$	Maximaler Ladezustand der Batterie eines Elektrofahrzeuges (entspricht der Batteriekapazität)
$SoC_{i,t}^{out}$	Ladezustand der Batterie von Auto $i$ am Ende von Zeiteinheit $t$
$T$	Anzahl der Zeitpunkte (6)
$t_{max}$	Zeiteinheit, in der das Maximum der summierten öffentlichen Ladeleistung auftritt $t$
$Z$	Anzahl der Zellen (25)

### 3.5.1. Mathematische Beschreibung

#### Zielfunktion

Die Zielfunktion des Modells optimiert, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Ladeverhalten, die räumliche Verteilung der öffentlichen Ladeinfrastruktur, sodass der Ladebedarf jederzeit gedeckt wird.

Es wird also für jede Zelle die summierte, öffentlich geladene Energiemenge  $\hat{E}_z^{public}$  minimiert. Diese Minimierung erfolgt für jede der 25 Zellen für jene Zeiteinheit eines Tages, in der die Nachfrage nach öffentlich geladener Energiemenge am größten ist ( $t_{max}$ ). Summierte, öffentlich geladene Energiemenge bedeutet in diesem Zusammenhang jene Energiemenge, die in einer Zelle und Zeiteinheit von allen Fahrzeugen, die sich zu diesem Zeitpunkt in dieser Zelle befinden, an öffentlichen Ladepunkten geladen wird. Die Optimierung wird für eine Zeitspanne von 24 Stunden durchgeführt. Zusätzlich zur optimalen Verteilung der öffentlich geladenen Energiemenge, berücksichtigt das Modell auch unterschiedliches Ladeverhalten von Bewohnern verschieden stark besiedelter Gebiete. Das Ladeverhalten wird, wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, durch gewisse Ladepräferenzen der Fahrer ( $P_{i,t,z}^{home}$ ,  $P_{i,t,z}^{public}$ ,  $P_{i,t,z}^{work}$ ) abgebildet. Damit wird die bestmögliche Berücksichtigung der unterschiedlichen Ladepräferenzen gewährleistet.

$$\min(\hat{E}_z^{public} - P^{all}) \quad (3.1)$$

mit

$$\hat{E}_z^{public} = \sum_{i=1}^N E_{i,t_{max},z}^{public} \quad (3.2)$$

$$P^{all} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z E_{i,t,z}^{public} \cdot P_{i,t,z}^{public} + E_{i,t,z}^{work} \cdot P_{i,t,z}^{work} + E_{i,t,z}^{home} \cdot P_{i,t,z}^{home} \quad (3.3)$$

Dabei ist  $t_{max}$  jene Zeiteinheit, in der das Maximum der summierten öffentlich geladenen Energiemenge der jeweiligen Zelle  $z$  auftritt.

#### Nebenbedingungen

Die wichtigsten Nebenbedingungen beschreiben den Ladezustand der Batterie der Elektrofahrzeuge (state of charge). Jedem Auto wird, wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, ein Initial-Ladezustand übergeben ( $SoC^{init}$ ). Das ist jener Ladezustand, den der Akku des Elektrofahrzeuges im ersten Zeitintervall  $t_1$  aufweist. In weiterer Folge wird der Ladezustand jedes Fahrzeuges durch die zwei Variablen  $SoC^{in}$  und  $SoC^{out}$  beschrieben.  $SoC^{in}$

### 3. Methode

ist der Ladezustand zu Beginn eines Zeitintervalls,  $SoC^{out}$  jener am Ende desselben Zeitintervalls. Dazwischen können Ladevorgänge stattfinden.

Die Nebenbedingung des Anfangs-Ladezustands für das Zeitintervall  $t_2$  lautet:

$$SoC_{i,t}^{in} = SoC_i^{init} - d_{i,t-1} \cdot c \quad (3.4)$$

Er verringert sich gegenüber dem Initial-Ladezustand abhängig von der gefahrenen Distanz und dem Verbrauch. Für alle weiteren Zeitintervalle gilt die Nebenbedingung in folgender Form:

$$SoC_{i,t}^{in} = SoC_{i,t-1}^{out} - d_{i,t-1} \cdot c \quad (3.5)$$

Der Ladezustand des Elektrofahrzeuges zu Beginn eines Zeitintervalls, hängt somit von dem Ladezustand am Ende des vorangegangenen Zeitintervalls ab. Die Fahrten werden im Modell zwischen zwei Zeitintervallen zurück gelegt.

Dabei muss der  $SoC^{in}$  zu jeder Zeit innerhalb des folgenden Bereichs liegen:

$$SoC^{min} \leq SoC_{i,t}^{in} \leq SoC^{max} \quad (3.6)$$

Der maximale Ladezustand  $SoC^{max}$  ist durch die Batteriekapazität gegeben. Der minimale  $SoC^{min}$  wird eingeführt um eine Tiefentladung der Batterie auszuschließen.

Für den End-Ladezustand aller Zeitintervalle (mit Ausnahme von  $t_1$ ) gilt:

$$\begin{aligned} SoC_{i,t}^{out} = & SoC_{i,t}^{in} + E_{i,t,z}^{home} \cdot \eta^{home} \cdot bin_{i,t,z}^{charge,home} \\ & + E_{i,t,z}^{public} \cdot \eta^{public} \cdot bin_{i,t,z}^{charge,public} \\ & + E_{i,t,z}^{work} \cdot \eta^{work} \cdot bin_{i,t,z}^{charge,work} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Er ergibt sich aus dem Anfangs-Ladezustand des Autos im selben Zeitintervall zuzüglich der Energiemenge, die öffentlich, privat oder am Arbeitsplatz geladen wird. Zusätzlich wird hier die Effizienz der drei unterschiedlichen Ladesäulen berücksichtigt. Über die binären Variablen  $bin^{charge,home}$ ,  $bin^{charge,public}$  und  $bin^{charge,work}$  wird sichergestellt, dass nur Fahrzeuge, die in der jeweiligen Zelle auch Zugang zu privater/öffentlicher/gewerblicher Ladeinfrastruktur haben, derartig laden können.

Natürlich darf auch der  $SoC^{out}$  nicht die Akkukapazität übersteigen. Dies wird durch die folgende Nebenbedingung sichergestellt.

$$SoC_{i,t}^{out} \leq SoC^{max} \quad (3.8)$$

### 3.5. Optimierungsmodell

Zusätzlich gilt für die Zeitintervalle  $t_2$  bis  $t_5$ :

$$SoC_{i,t}^{out} \geq d_{i,t} \cdot c + SoC^{min} \quad (3.9)$$

Mit dieser Nebenbedingung wird garantiert, dass der Ladezustand vor Antritt der nächsten Fahrt immer ausreichend hoch ist, inklusive einem Puffer ( $SoC^{min}$ ) um eine Tiefentladung der Batterie zu verhindern.

Damit das Fahrzeug am Ende des Zeitintervalls  $t_6$  (also nach 24 Stunden) wieder seinen Initial-Ladezustand aufweist, wird die folgende Nebenbedingung eingeführt:

$$SoC_{i,t}^{out} = SoC_i^{init} \quad (3.10)$$

Die drei möglichen Optionen des Ladens (öffentlich, privat, am Arbeitsplatz) weisen verschiedene Ladeleistungen auf. Demnach ist auch die Energiemenge, die innerhalb eines Zeitintervalls ( $h_{timeslot}$ ) geladen werden kann unterschiedlich groß. Die Nichtnegativitätsbedingung gilt für alle drei Optionen gleichermaßen. Beides fließt durch die folgenden Nebenbedingungen in das Optimierungsmodell ein.

$$0 \leq E_{i,t,z}^{home} \leq power_{home,max} \cdot h_{timeslot} \quad (3.11)$$

$$0 \leq E_{i,t,z}^{public} \leq power_{public,max} \cdot h_{timeslot} \quad (3.12)$$

$$0 \leq E_{i,t,z}^{work} \leq power_{work,max} \cdot h_{timeslot} \quad (3.13)$$

Die weiteren Nebenbedingungen können dem unten dargestellten Modell entnommen werden.

Zusammenfassend ergibt sich das folgende Optimierungsmodell:

#### Optimierungsmodell:

Zielfunktion zur Minimierung der summierten, öffentlich geladenen Energiemenge, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Ladepräferenzen:

$$\min(\hat{E}_z^{public} - P^{all}) \quad (3.14)$$

mit

$$\hat{E}_z^{public} = \sum_{i=1}^N E_{i,t_{max},z}^{public} \quad (3.15)$$

$$P^{all} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z E_{i,t,z}^{public} \cdot P_{i,t,z}^{public} + E_{i,t,z}^{work} \cdot P_{i,t,z}^{work} + E_{i,t,z}^{home} \cdot P_{i,t,z}^{home} \quad (3.16)$$

### 3. Methode

Nebenbedingungen:

$$SoC_{i,t}^{in} = SoC_i^{init} - d_{i,t-1} \cdot c \quad \text{für } t = 2 \quad (3.17)$$

$$SoC_{i,t}^{in} = SoC_{i,t-1}^{out} - d_{i,t-1} \cdot c \quad \text{für } t \in \{3 \dots T\} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} SoC_{i,t}^{out} = & SoC_{i,t}^{in} + E_{i,t,z}^{home} \cdot \eta^{home} \cdot bin_{i,t,z}^{charge,home} \\ & + E_{i,t,z}^{public} \cdot \eta^{public} \cdot bin_{i,t,z}^{charge,public} \\ & + E_{i,t,z}^{work} \cdot \eta^{work} \cdot bin_{i,t,z}^{charge,work} \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$SoC_{i,t}^{out} \geq d_{i,t} \cdot c + SoC^{min} \quad \text{für } t \in \{2 \dots T-1\} \quad (3.20)$$

$$SoC_{i,t}^{out} = SoC_i^{init} \quad \text{für } t = T \quad (3.21)$$

$$SoC_{i,t}^{out} \leq SoC^{max} \quad (3.22)$$

$$SoC^{min} \leq SoC_{i,t}^{in} \leq SoC^{max} \quad (3.23)$$

$$E_{i,t,z}^{home} = E_{i,t,z}^{home} \cdot bin_{i,t,z}^{charge,home} \quad (3.24)$$

$$E_{i,t,z}^{public} = E_{i,t,z}^{public} \cdot bin_{i,t,z}^{charge,public} \quad (3.25)$$

$$E_{i,t,z}^{work} = E_{i,t,z}^{work} \cdot bin_{i,t,z}^{charge,work} \quad (3.26)$$

$$0 \leq E_{i,t,z}^{home} \leq power_{home,max} \cdot h_{timeslot} \quad (3.27)$$

$$0 \leq E_{i,t,z}^{public} \leq power_{public,max} \cdot h_{timeslot} \quad (3.28)$$

$$0 \leq E_{i,t,z}^{work} \leq power_{work,max} \cdot h_{timeslot} \quad (3.29)$$

$$\hat{E}_z^{public} \geq 0 \quad (3.30)$$

$$P^{all} \geq 0 \quad (3.31)$$

### 3.5.2. Ablaufdiagramm

Das im vorherigen Abschnitt mathematisch beschriebene Modell soll nun anschaulich anhand der Fahrt eines Autos erklärt werden. Der exemplarische Ablauf für einen Tag ist in Abbildung 3.13 grafisch dargestellt.

Parameter, die das Elektroauto exogen übergeben bekommt, und die über den Modellzeitraum konstant bleiben sind:

- Präferenz für öffentliches Laden:  $P^{public}$
- Präferenz für privates Laden:  $P^{home}$
- Präferenz für Laden am Arbeitsplatz:  $P^{work}$
- spezifischer Verbrauch  $c$
- Batteriekapazität, die im Modell gleichzusetzen ist mit dem maximalen Ladezustand  $SoC^{max}$
- binäre Variablen, die über den Zugang zu öffentlicher/privater/gewerblicher Ladeinfrastruktur entscheiden (siehe Kapitel 3.4), dabei handelt es sich für jedes Auto um jeweils eine  $Z \times T$  - Matrix. Diese beschreibt für jedes Auto, zu jedem Zeitpunkt, für jede Zelle, den Ladezugang zu allen drei Ladeoptionen. 1 bedeutet laden ist möglich bzw. der Zugang ist vorhanden, 0 dagegen, dass kein Zugang vorhanden ist.

Darüber hinaus werden auch Parameter, die die drei unterschiedlichen Ladesäulen betreffen, von außen übergeben. Das sind:

- Ladeleistung der öffentlichen Ladesäule:  $power_{public,max}$
- Effizienz der öffentlichen Ladesäule:  $\eta^{public}$
- Ladeleistung der privaten Ladesäule:  $power_{home,max}$
- Effizienz der privaten Ladesäule:  $\eta^{home}$
- Ladeleistung der gewerblichen Ladesäule:  $power_{work,max}$
- Effizienz der privaten Ladesäule:  $\eta^{work}$

Eine weitere exogene Größe des Fahrzeuges ist sein Initial-Ladezustand  $SoC_{A1}^{init}$ , also der Ladezustand, den das Auto im ersten Zeitintervall eines Tages  $t_1$  aufweist. Legt das Auto nun zwischen den Zeitintervallen  $t_1$  und  $t_2$  die Distanz  $d_1$  zurück, so wird sich laut Gleichung 3.17 sein Ladezustand auf den Wert  $SoC_{A1,t_2}^{in}$  reduzieren. Im exemplarischen Beispiel befindet sich das Auto nun in seiner Arbeitszelle, in der es für das gesamte Zeitintervall, im Modell sind das 4 Stunden verweilen wird. Der Ladezustand, mit dem diese Zelle verlassen wird ist  $SoC_{A1,t_2}^{out}$ . Die Bedingung, die erfüllt sein muss damit eine Weiterfahrt möglich ist, ist laut Gleichung 3.20:

$$SoC_{i,t}^{out} \geq d_{i,t} \cdot c + SoC^{min} \quad (3.32)$$

### 3. Methode

Nun entscheidet das Modell, ob das Auto in dieser Zelle geladen wird. Falls ja gibt es zwei Möglichkeiten:

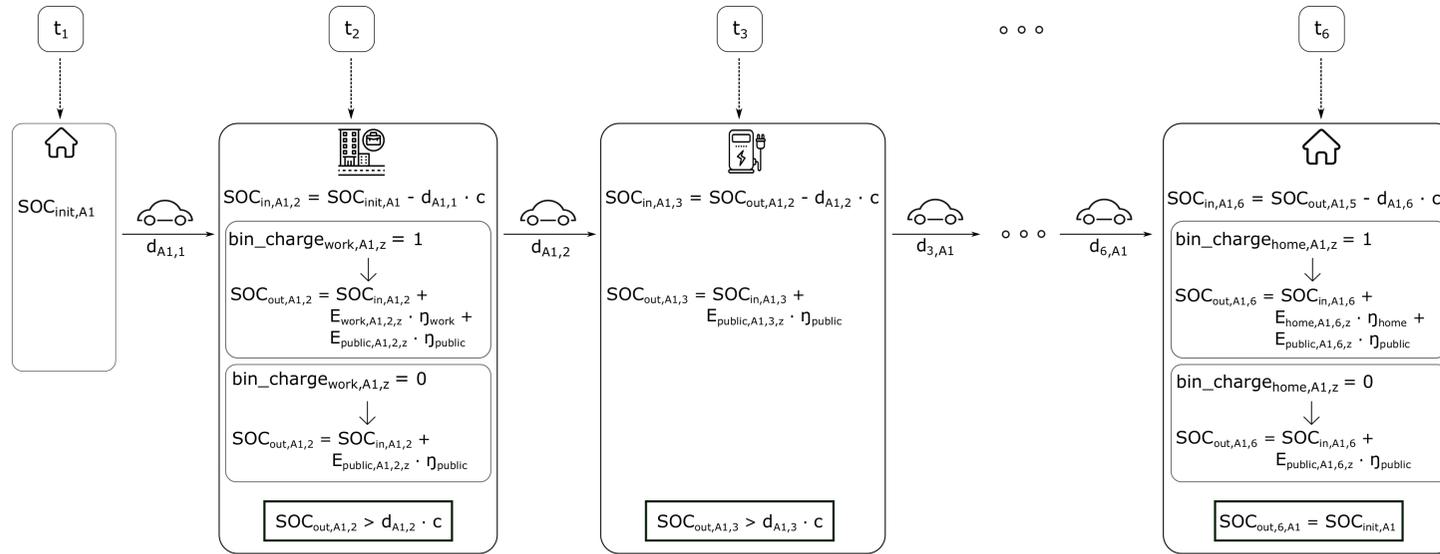
- Das Auto verfügt über einen Zugang zur Ladeinfrastruktur am Arbeitsplatz, dann kann abhängig von seiner persönlichen Präferenz am Arbeitsplatz oder öffentlich geladen werden.
- Das Auto verfügt über keinen Zugang zur Ladeinfrastruktur am Arbeitsplatz. Da es sich auch nicht in seiner Wohnzelle befindet (Bewegungen innerhalb von Zellen werden im Modell nicht abgebildet) bleibt nur die Möglichkeit des öffentlichen Ladens.

Die Menge der geladenen Energie wird ebenso vom Modell entschieden, lediglich die, in 3.5.1 beschriebenen Nebenbedingungen müssen zu jeder Zeit erfüllt sein.

Im nächsten Zeitintervall  $t_3$  befindet sich das Auto in einer öffentlichen Zelle (also weder seiner Wohn- noch Arbeitszelle). Die einzige Möglichkeit ist in diesem Fall also das öffentliche Laden. Die Nebenbedingung des  $SoC_{A1,t_3}^{out}$  muss jedenfalls wieder erfüllt werden.

Genauso verhält es sich für die nächsten zwei Zeitintervalle in denen eventuell öffentliche Stopps eingelegt werden.

Zum Zeitpunkt  $t_6$  befindet sich das Fahrzeug wieder in seiner Wohnzelle. Laut Nebenbedingung (3.21), muss am Ende dieser Zeitspanne, wieder der Initial-Ladezustand erreicht werden. Abhängig vom privaten Ladezugang ( $bin_{i,t,z}^{charge,home}$ ) kann nun entweder zu Hause oder öffentlich geladen werden. Falls sich das Fahrzeug bereits im Zeitintervall  $t_5$  in seiner Wohnzelle befand und auf den  $SoC_{A1}^{init}$  aufgeladen wurde, besteht auch die Möglichkeit, dass in Zeitpunkt  $t_6$  gar nicht mehr geladen wird. Darüber entscheidet das Optimierungsmodell, sodass eine optimale Verteilung der öffentlichen Ladeinfrastruktur mit gleichzeitig maximaler Zufriedenheit aller Fahrer erreicht wird.



Parameter des Elektroautos:

 A1	$P_{home,A1}$	Verbrauch c: 0.2 kWh/km Batteriekapazität: 42.2 kWh
	$P_{public,A1}$	
	$P_{work,A1}$	

Ladeleistung der Ladesäulen:

 3.5 kW	 10 kW	 22 kW
------------	-----------	-----------

Abbildung 3.13.: Exemplarischer Ablauf des Optimierungsmodells für ein Auto und einen Tag (Icons erstellt von Freepik/monkik/Goodware von [23])

### 3. Methode

#### 3.5.3. Daten und Annahmen

In diesem Abschnitt werden alle, für die Modellrechnungen notwendigen getroffenen Annahmen beschrieben. Das erfolgt zunächst für das Basismodell und in weiterer Folge für alle Szenarien, die gerechnet werden.

#### Referenzszenarien

Das Referenzszenario wird für drei unterschiedliche Elektrifizierungsstufen 100%, 50% und 10% (Anteil der Elektrofahrzeuge am Gesamt-Fahrzeugbestand) gerechnet, jeweils für einen Werktag, Samstag und Sonntag. Die Optimierung wird dabei immer für einen Tag, also einen Zeitraum von 24 Stunden durchgeführt. Die entsprechende Festlegung der Fahrten wurde bereits in Kapitel 3.3 beschrieben. Die Verteilung der Fahrten bleibt für jede der Elektrifizierungsstufen gleich und wird dem Modell vor der eigentlichen Optimierung übergeben. Eine Fahrt beinhaltet:

- Standort (Zelle) zu jedem Zeitpunkt  $t_1$  bis  $t_6$
- Anfangsladezustand der Batterie  $SoC^{init}$
- Präferenz für öffentliches Laden  $P^{public} \in \{0...1\}$
- Präferenz für privates Laden  $P^{home} \in \{0...1\}$
- Präferenz für das Laden am Arbeitsplatz  $P^{work} \in \{0...1\}$

Darüber hinaus wird für jedes Auto angegeben:

- Ladezugang zu öffentlicher Ladeinfrastruktur  $bin^{charge,public} \in \{0,1\}$
- Ladezugang zu privater Ladeinfrastruktur  $bin^{charge,home} \in \{0,1\}$
- Ladezugang zu gewerblicher Ladeinfrastruktur  $bin^{charge,work} \in \{0,1\}$

in jeder Zelle, entsprechend der in Kapitel 3.4 getroffenen Annahmen

Diese Variablen, die dem Modell exogen übergeben werden bleiben in den folgenden Szenarien unverändert. Ebenso wie die folgenden Daten:

- Minimaler ( $SoC^{min}$ ) und maximaler ( $SoC^{max}$ ) Ladezustand der Batterie in Prozent der Batteriekapazität.
- Distanz von jeder Zelle in jede andere Zelle, wie in Kapitel 3.2 definiert
- Ladeleistung privater Ladeinfrastruktur
- Ladeleistung gewerblicher Ladeinfrastruktur
- Effizienz der drei Ladesäulen ( $\eta^{home}$ ,  $\eta^{public}$ ,  $\eta^{work}$ )
- Anzahl der Zeitintervalle eines Tages und dementsprechend die Dauer einer Zeiteinheit  $h^{timeslot}$

Unterschiede ergeben sich nur in den technologischen Parametern des Fahrzeuges und der öffentlichen Ladeinfrastruktur. Im Basisszenario werden unabhängig vom Elektroauto-Anteil und Wochentag, die folgenden Werte angenommen:

- spezifischer Verbrauch eines Elektrofahrzeuges:  $c = 0.20 \text{ kWh/km}$
- Batteriekapazität des Elektrofahrzeuges:  $\text{battery} = 42.2 \text{ kWh}$
- öffentliche Ladeleistung einer Ladesäule  $\text{power}^{\text{public,max}} = 22 \text{ kW}$

Die Werte die das Fahrzeug betreffen, basieren auf technischen Daten des BMW i3 [24], eines der momentan am häufigsten zugelassenen Elektroautos in Österreich [7]. Für die Leistung öffentlicher Ladesäulen wurde ein Wert herangezogen, der als guter Durchschnittswert des momentanen Bestandes gesehen werden kann.

#### Szenarien der zukünftigen technologischen Entwicklung

In den gerechneten Szenarien wird die zukünftige technologische Entwicklung der Elektroautos und der öffentlichen Ladestationen betrachtet. Alle Szenarien werden mit der Annahme einer 100%igen Elektrifizierung des Verkehrssektors für einen Werktag gerechnet. Die entsprechenden Parameter der Fahrten und der Zugang zur Ladeinfrastruktur bleiben gegenüber dem Basismodell unverändert. Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalysen werden in Kapitel 5 präsentiert und diskutiert.

#### Technologische Entwicklung der Effizienz der Fahrzeuge

In diesem Szenario wird der spezifische Verbrauch des Elektrofahrzeuges variiert. Es ist anzunehmen, dass sich dieser Wert in Zukunft deutlich verringert, was die Energieeffizienz des Elektrofahrzeugs erheblich steigern wird. Die Modellierung erfolgt für die folgenden angenommenen Werte<sup>2</sup>:

$$c = 0.15 \text{ kWh/km} \quad \text{und} \\ c = 0.10 \text{ kWh/km}$$

#### Technologische Entwicklung der Batteriekapazität der Fahrzeuge

Dieses Szenario berücksichtigt die Fortschritte der Batterietechnologie, also eine Steigerung der Batteriekapazität, die in Zukunft für größere Reichweiten sorgen wird. Dabei wird vor allem untersucht ob dieser Parameter auch Einfluss auf Kurzstreckenfahrten, wie sie in dieser Arbeit modelliert werden, hat. Als zukünftig mögliche Werte für die Batteriekapazität eines ähnlichen Fahrzeugmodells werden die doppelte und dreifache Batteriekapazität des Basismodells herangezogen:

---

<sup>2</sup>Vgl. derzeit eines der sparsamsten Elektroautos Hyundai IONIQ Elektro Level 3:  $0.138 \text{ kWh/km}$  (laut Herstellerangabe) [25]

### 3. Methode

$battery = 84.4 \text{ kWh}$  und

$battery = 126.6 \text{ kWh}$

#### **Technologische Entwicklung der Ladesäulen**

Der letzte Parameter, der in Zuge der Sensitivitätsanalysen verändert wird ist die Ladeleistung öffentlicher Ladesäulen. Eine Steigerung der Ladeleistung, senkt die Ladedauer und erhöht die Anzahl der Fahrzeuge, die in einer Stunde geladen werden können. Es wird mit einer dreifachen und sechsfachen Erhöhung, der im Basismodell angenommenen Ladeleistung gerechnet:

$power^{public,max} = 66 \text{ kW}$  und

$power^{public,max} = 132 \text{ kW}$

Die ausgewählten Parameterwerte der einzelnen Szenarien werden in Tabelle 3.11 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3.11.: Überblick über die Parameter der einzelnen Szenarien

Variable	Referenz	Entwicklung Effizienz	Entwicklung Batteriekapazität	Entwicklung Ladesäulen
$battery$	42.2 kWh	42.2 kWh	84.4 kWh und 126.6 kWh	42.2 kWh
$c$	0.20 kWh/km	0.15 kWh/km und 0.10 kWh/km	0.20 kWh/km	0.20 kWh/km
$\eta^{home}$	0.98	0.98	0.98	0.98
$\eta^{public}$	0.90	0.90	0.90	0.90
$\eta^{work}$	0.95	0.95	0.95	0.95
$power_{home,max}$	3.5 kW	3.5 kW	3.5 kW	3.5 kW
$power_{public,max}$	22 kW	22 kW	22 kW	66 kW und 132 kW
$power_{work,max}$	10 kW	10 kW	10 kW	10 kW
$SoC^{min}$	10% · battery	10% · battery	10% · battery	10% · battery
$SoC^{max}$	100% · battery	100% · battery	100% · battery	100% · battery



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 4. Ergebnisse: Öffentliche Ladestationen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des im vorigen Abschnitt (3.5.3) beschriebenen Referenzszenarios präsentiert. Alle Berechnungen werden für einen Elektrofahrzeuganteil von 100%, 50% und 10% durchgeführt. Darüber hinaus wird der Einfluss unterschiedlicher Wochentage und Bevölkerungsdichten untersucht und diskutiert.

### 4.1. Einfluss des Elektrofahrzeuganteils

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Ausbaustufen öffentlicher Ladeinfrastruktur in Abhängigkeit vom Elektrofahrzeuganteil untersucht.

Das Modell ermittelt, wie in Abschnitt 3.5.1 beschrieben, die optimale räumliche Verteilung der öffentlichen Ladeinfrastruktur, sodass der Ladebedarf jederzeit gedeckt wird. Es wird also für jede Zelle die summierte, öffentlich geladene Energiemenge minimiert. Zusätzlich zu dieser Energiemenge liefert das Modell auch die Anzahl der Fahrzeuge, die diese Energiemenge im jeweiligen Zeitintervall laden. Diese beiden Ergebniswerte können nun auf zwei Arten interpretiert werden, die im Folgenden Fall A und Fall B genannt werden.

#### Fall A:

Es wird die Anzahl der Fahrzeuge herangezogen, die in jenem Zeitraum, in welchem die errechnete optimierte Energiemenge auftritt, laden. Diese Zahl stellt bei der Annahme, dass alle Ladevorgänge gleichzeitig statt finden die notwendige Zahl an Ladesäulen dar. Die ermittelte Anzahl an Ladesäulen ist hierbei höher als bei Fall B. Hier geht man nämlich von der Annahme aus, dass alle Autos gleichzeitig laden. Dies stellt sozusagen den „Worst Case“ für die notwendige Anzahl an öffentlichen Ladesäulen dar. Das Ergebnis dieser Methode kann also als die maximale Anzahl an Ladesäulen, die notwendig ist um den Ladebedarf des privaten Individualverkehrs jederzeit decken zu können, interpretiert werden.

#### 4. Ergebnisse: Öffentliche Ladestationen

##### **Fall B:**

In diesem Fall wird die errechnete optimierte Energiemenge durch die Ladeleistung einer öffentlichen Ladesäule (in einem Zeitintervall von vier Stunden) dividiert. Die sich dadurch ergebende Anzahl an öffentlichen Ladesäulen ist dementsprechend niedriger als mit Methode A. Sie stellt somit die minimale Anzahl an Ladesäulen dar, die notwendig ist um den Ladebedarf des privaten Individualverkehrs jederzeit zu decken.

Betrachtet man die Ergebnisse beider Fälle ergibt sich für jede Zelle ein Minimum und Maximum an öffentlichen Ladesäulen. Das Minimum stellt jene Menge dar, die benötigt wird, wenn alle Autos innerhalb der vier Stunden zeitlich optimal verteilt laden. Dagegen ist das Maximum jene Anzahl, die notwendig wäre, würden alle Fahrer, die in diesem Zeitraum einen Ladebedarf haben, gleichzeitig laden.

Im ersten Referenzszenario, also der Optimierung für einen EV-Anteil von 100% (Kapitel 4.1.1) werden die Ergebnisse beider Fälle (A und B) und die entsprechenden Unterschiede präsentiert. Die Ergebnisdarstellung für alle weiteren Referenzszenarien und Sensitivitätsanalysen erfolgt, sofern nicht anders vermerkt, jedoch nur für Fall B. Die Visualisierung der Ergebnisse einzelner Fallstudien erfolgt jeweils in einer der Zellstruktur entsprechenden Abbildung. Die Werte der einzelnen Zellen entsprechen der optimierten Anzahl an öffentlichen Ladesäulen. Durch die farbliche Darstellung werden Extremwerte sofort sichtbar gemacht, je dunkler die Zelle, desto mehr Ladesäulen sind zur Deckung des Ladebedarfs nötig.

Um die Rechenzeit zu verkürzen, werden die Berechnungen für einen Werktag, Samstag und Sonntag einzeln durchgeführt. Für jede Zelle wird dann das Maximum dieser drei Tage herangezogen, da das entscheidend für den notwendigen Infrastrukturausbau ist. Der Einfluss einzelner Wochentage und der Bevölkerungsdichte wird anschließend in Kapitel 4.2 und Kapitel 4.3 diskutiert.

## 4.1. Einfluss des Elektrofahrzeuganteils

### 4.1.1. Anteil von 100%

In diesem Referenzszenario wird der Fall einer 100%igen Elektrifizierung des privaten Individualverkehrs betrachtet. Die Optimierung erfolgt mit den in Abschnitt 3.5.3 angeführten Daten und Annahmen. Die Ergebnisse werden mit den im vorigen Abschnitt (4.1) beschriebenen zwei Fällen ausgewertet und in Abbildung 4.1 präsentiert. Die angeführten Werte stellen für jede Zelle das jeweilige Maximum aus den drei Modellläufen (für einen Werktag, Samstag und Sonntag) dar. Es wird die Annahme getroffen, dass im gesamten Modellgebiet nur Ladesäulen mit einer Ladeleistung von 22 kW errichtet werden.

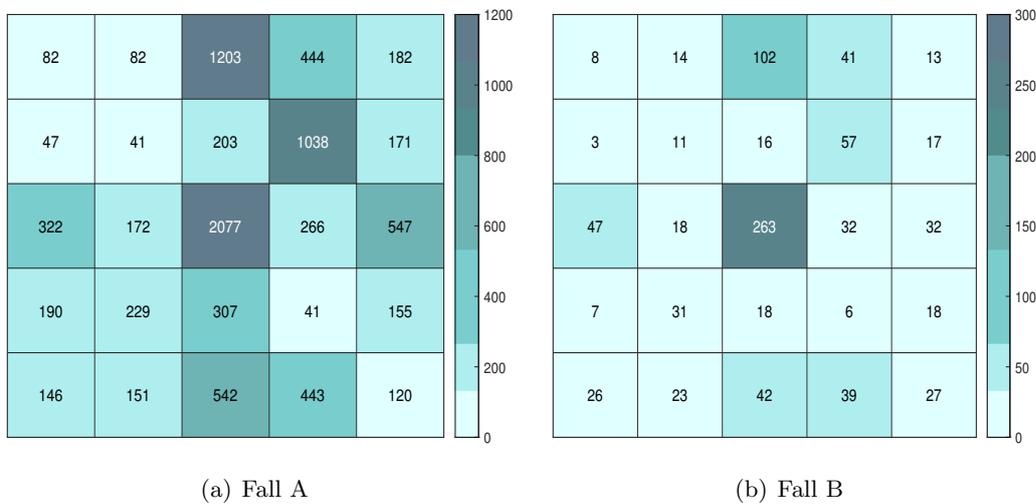


Abbildung 4.1.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen, Maximum aller Wochentage, ermittelt über Fall A und Fall B

Um die genannten und in Abbildung 4.1 ersichtlichen Unterschiede aufzuzeigen wird im Folgenden ein Berechnungsbeispiel für Zelle 25 für Fall A und Fall B präsentiert. Das Optimierungsmodell liefert für diese Zelle das folgende Ergebnis:

*geladene Energiemenge: 2357 kWh*  
*geladene Autos: 120*

- **Fall A:** in diesem Fall wird die Anzahl der geladenen Autos als ausschlaggebender Wert für die Ermittlung der öffentlichen Ladesäulen herangezogen. Es wird davon ausgegangen, die geladene Energiemenge teilt sich gleichmäßig auf die Anzahl der ladenden Fahrzeuge auf und alle laden gleichzeitig. Für dieses „worst case - Szenario“, sind in Zelle 25 also 120 öffentliche Ladesäulen erforderlich. Die maximale Energiemenge, die mit dieser Anzahl an Ladesäulen geladen werden könnte, beläuft

#### 4. Ergebnisse: Öffentliche Ladestationen

sich auf 10 560 kWh. Dies entspricht der vier- bis fünffachen Energiemenge wie unter Fall B ( $120 \cdot 22 \text{ kW} \cdot 4 \text{ h}$ ).

- **Fall B:** Die Anzahl der notwendigen Ladesäulen errechnet sich wie folgt:

$$\frac{\hat{E}_{25}^{public}}{h_{timeslot} \cdot power_{public,max}} = \frac{2357 \text{ kWh}}{4 \text{ h} \cdot 22 \text{ kW}} = 27$$

Für den Fall einer idealen Verteilung der ladenden Autos sind also nur 27 Ladesäulen notwendig. Die Anzahl der Säulen entspricht in diesem Fall immer auch der Anzahl der Fahrzeuge, die in einer Stunde gleichzeitig laden können. Im Beispiel wären das für Zelle 25 also 27 Fahrzeuge.

Um genauere Werte zu erhalten, müsste das Modell zeitlich höher aufgelöst, und dementsprechend die Zeitspannen deutlich kürzer angesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit geht es allerdings vorrangig um die Entwicklung einer Methode zur Analyse von Bewegungsflüssen des privaten Individualverkehrs. Auf diese Weise werden grobe Trends aufgezeigt, die konkreten Zahlenwerte stehen hier im Hintergrund.

In der weiteren Darstellung werden die Ergebnisse entsprechend Fall B präsentiert. Sämtliche Abbildungen des Falls A können dem Anhang entnommen werden.

Wie bereits beschrieben kann Abbildung 4.1 (b) also die optimierte Anzahl an öffentlichen 22 kW Ladesäulen, für den Fall einer idealen Verteilung der ladenden Autos, entnommen werden. Diese Zahlen decken, wie in Kapitel 3 erklärt, nur den Ladebedarf des privaten Individualverkehrs innerhalb des Modellgebiets ab. Insgesamt werden für das betrachtete Szenario 79 908 kWh an Energie für die Deckung des Ladebedarfs eines Tages im gesamten Modellgebiet benötigt. Ausgehend von der in 3.5.3 getroffenen Annahme, dass nur Ladesäulen mit einer Ladeleistung von 22 kW errichtet werden, entspricht das 911 Ladesäulen. Davon befinden sich fast 30%, also 263 Ladesäulen in Zelle 13 (St. Pölten Stadt). Weitere, laut den Modellergebnissen, in Hinblick auf die Anzahl der Ladesäulen stärker ausgebaut Gebiete sind vor allem Zellen, die entweder als Industriegebiete klassifiziert werden (siehe 3.2) oder entsprechend 3.3.1 eine große Zahl an Einkaufs- bzw. Freizeitmöglichkeiten aufweisen. Demgegenüber stehen Regionen, die der Kategorie „Land“ entsprechen und keine attraktiven Einkaufs- bzw. Freizeitgebiete darstellen. In jenen Zellen ist der Ladeinfrastrukturbedarf sehr gering, die optimierte Anzahl an Ladesäulen liegt im einstelligen Bereich. Das begründet sich darin, dass diese Zellen relativ selten frequentiert werden und ihre Bewohner eine hohe Präferenz für das Laden im eigenen Haus aufweisen.

## 4.1. Einfluss des Elektrofahrzeuganteils

### 4.1.2. Anteil von 50%

In diesem Szenario wird der Fall einer 50%igen Elektrifizierung des privaten Individualverkehrs betrachtet. Die Optimierung erfolgt wieder mit den in Abschnitt 3.5.3 angeführten Daten und Annahmen. Die Verteilung der Fahrten bleibt im Vergleich zum 100%-Szenario gleich. Die Ergebnisse werden mit Fall B (siehe 4.1) ausgewertet und in Abbildung 4.2 präsentiert. Die angeführten Werte stellen für jede Zelle erneut das jeweilige Maximum aus den drei Modellläufen (für einen Werktag, Samstag und Sonntag) dar. Die Ergebnisse der einzelnen Modellläufe können dem Anhang entnommen werden.

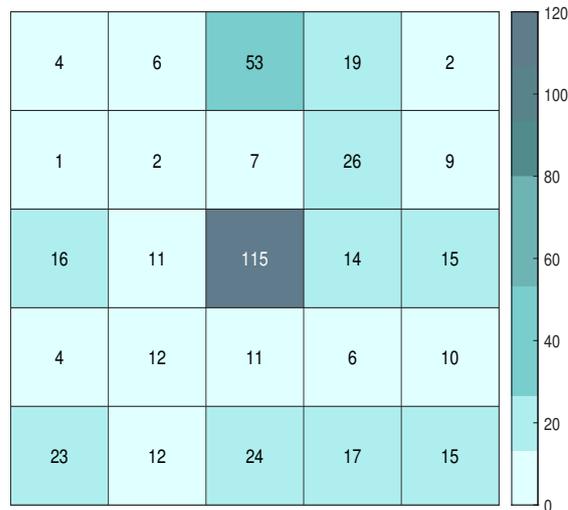


Abbildung 4.2.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen, Maximum aller Wochentage

Insgesamt tritt, laut den Ergebnissen des Optimierungsmodells, ein Energiebedarf von 37 788 kWh auf. Mit einem Elektrofahrzeug-Anteil von 50% sinkt also auch der Gesamtenergiebedarf aller Fahrzeuge im Modellgebiet um zirka die Hälfte, gegenüber dem Szenario einer 100%igen Elektrifizierung. Demnach werden auch nur die Hälfte der Ladesäulen, nämlich 434 benötigt um den Ladebedarf zu decken. Wie erwartet folgt der Energiebedarf somit der Elektrifizierungsrate linear. Diese Veränderung verläuft jedoch nicht für alle Zellen gleich. Abbildung 4.3 zeigt für jede Zelle die Anzahl der Ladesäulen in Prozent, ausgehend von den Ergebnissen des 100% Szenarios. Während die Anzahl der Ladesäulen in den Zellen 5 und 7 stark sinkt (um über 80%), bleibt sie für Zelle 19 unverändert. Auf diese Unterschiede wird in Kapitel 4.3 näher eingegangen.

#### 4. Ergebnisse: Öffentliche Ladestationen

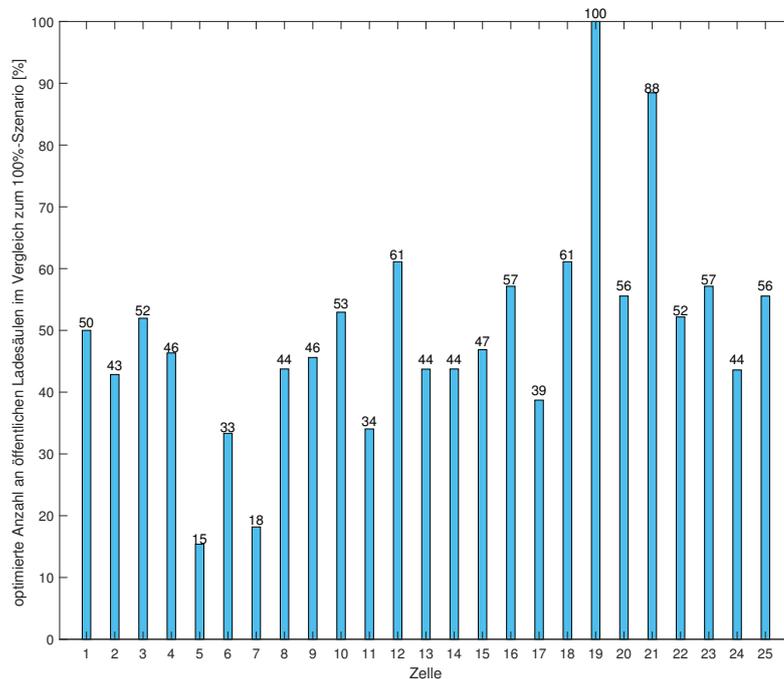


Abbildung 4.3.: relative Anzahl öffentlicher Ladesäulen im Vergleich zum 100%-Szenario

##### 4.1.3. Anteil von 10%

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse für einen Elektrofahrzeug-Anteil von 10% präsentiert. Die Optimierung erfolgt analog zu 4.1.2 mit den in Abschnitt 3.5.3 getroffenen Annahmen. Die grafische Auswertung dieses Szenarios kann Abbildung 4.4 entnommen werden.

Der gesamte Energiebedarf errechnet sich in diesem Fall zu 6 889 kWh, entspricht somit in etwa 9% jenes bei einem EV-Anteil von 100%. Es lässt sich folglich erneut ein linearer Zusammenhang zwischen dem Grad der Elektrifizierung und dem entsprechenden Energiebedarf erkennen. Analog zum vorigen Abschnitt, verhält sich dieser im Mittel lineare Verlauf nicht für alle Zellen gleich. Die relative Anzahl der Ladesäulen im Vergleich zum 100%-Szenario (in Prozent), ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

#### 4.1. Einfluss des Elektrofahrzeuganteils

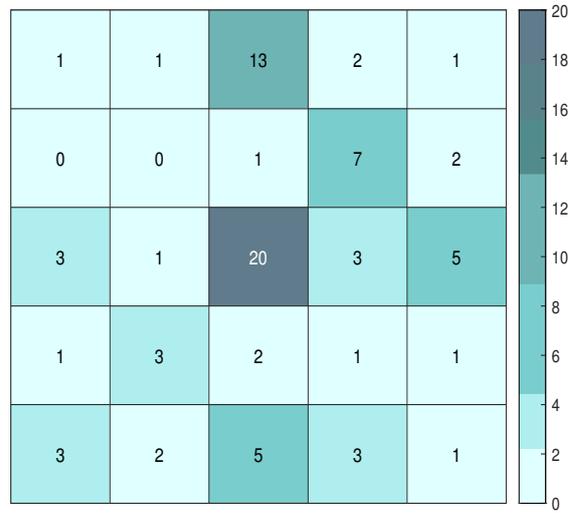


Abbildung 4.4.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen, Maximum aller Wochentage

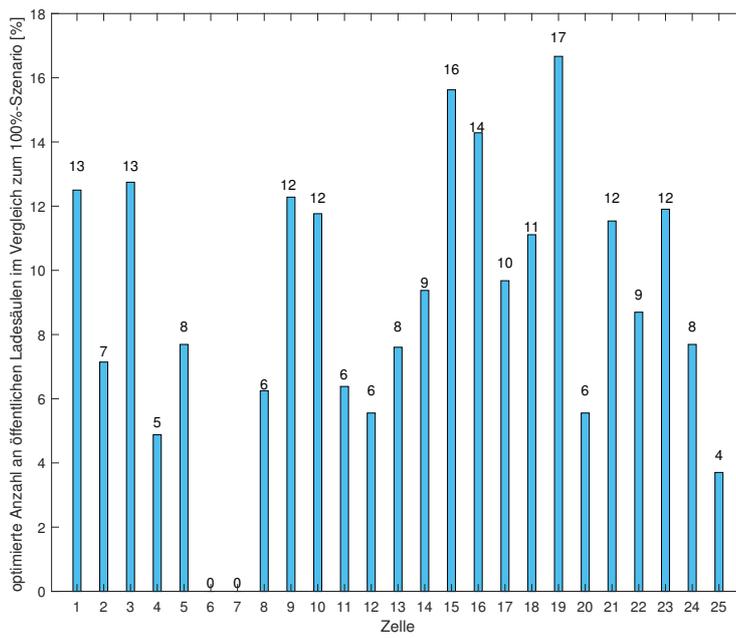


Abbildung 4.5.: relative Anzahl öffentlicher Ladesäulen im Vergleich zum 100%-Szenario

## 4. Ergebnisse: Öffentliche Ladestationen

### 4.2. Einfluss des Wochentages

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des Wochentages auf die optimale Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladeinfrastruktur untersucht.

Wie in Kapitel 3.5.3 beschrieben, werden sämtliche Modellrechnungen für einen Werktag, Samstag und Sonntag durchgeführt. Der Unterschied liegt in der Anzahl mobiler Personen, und vor allem an den Fahrten und ihren Fahrtzwecken. Während an einem Werktag Berufsverkehr die Hauptrolle spielt, sind das am Samstag Einkaufsfahrten und am Sonntag vorwiegend Freizeitfahrten. Dieser Umstand wirkt sich, abhängig von der Zelle, unterschiedlich stark auf die erforderliche Anzahl an Ladesäulen aus. Jedenfalls ist, damit der Ladebedarf jederzeit gedeckt werden kann, für jede Zelle der Tag ausschlaggebend, an dem die höchste Energiemenge nachgefragt wird. Aus diesem Grund wurde in Kapitel 4.1 zur Ergebnisdarstellung jener Wochentag herangezogen, für den, in der jeweiligen Zelle, der Energiebedarf am höchsten ist. In diesem Abschnitt werden die Unterschiede zwischen den Wochentagen für unterschiedliche Zellen genauer untersucht.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen unterschiedlicher Wochentage für einen Elektrofahrzeuganteil von 100% sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Wie bereits in den Kapiteln zuvor, handelt es sich auch in diesem Fall um öffentliche 22 kW Ladesäulen.

Auf den ersten Blick sticht vor allem die mittlere Zelle 13 (St. Pölten Stadt) hervor. Hier ist an allen Wochentagen der Energiebedarf am höchsten von allen Zellen. Das liegt zum einen an der hohen Zahl an Einpendlern von denen jedoch nur wenige an ihrem Arbeitsplatz laden können (siehe Kapitel 3.4) und somit auf die öffentliche Ladeinfrastruktur angewiesen sind. Zum anderen haben in Zelle 13, die laut Kapitel 3.2 als „Stadt“ kategorisiert wird, nur 50% aller Fahrzeuge einen privaten Ladezugang (siehe Kapitel 3.4), und auch vergleichsweise viele eine hohe Präferenz für das öffentliche Laden (laut Annahme in Kapitel 3.3.2). Da St. Pölten auch für Einkaufs- und Freizeitfahrten oft besucht wird, bleibt der Energiebedarf auch an beiden Wochenendtagen relativ hoch.

Der Energiebedarf an Werktagen (siehe Abbildung 4.6 (a)) ist darüber hinaus auch in als „Industrie“ kategorisierten Gebieten, höher als am Wochenende. Begründet wird das ebenso durch die hohe Zahl an Berufseinpendlern. Zwar weisen hier, im Vergleich zur „Stadt-Zelle“, relativ viele Fahrzeuge einen gewerblichen Ladezugang auf, jedoch sind das weit nicht alle (laut Annahme in Kapitel 3.4: 55%). Zusätzlich dazu haben 25% der Bewohner dieser Zellen keinen Zugang zu privater Ladeinfrastruktur, was sich auch auf die Anzahl öffentlicher Ladesäulen auswirkt.

## 4.2. Einfluss des Wochentages

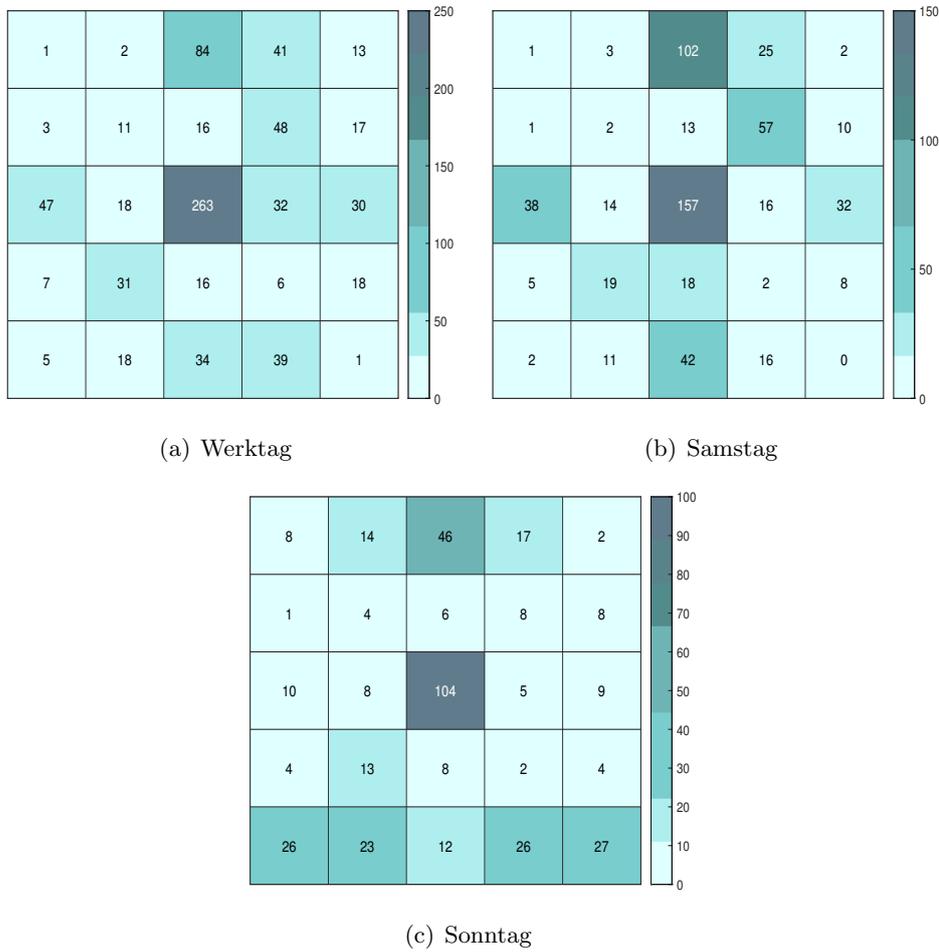


Abbildung 4.6.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an unterschiedlichen Wochentagen für einen Elektrofahrzeuganteil von 100%

Betrachtet man die Ergebnisse der Modellrechnung für Samstag, ist die Nachfrage nach öffentlicher Ladeinfrastruktur vor allem in Zellen, die laut Kapitel 3.3.1 viele Einkaufsmöglichkeiten aufweisen, am Größten. Diese Erkenntnis lässt sich analog für Sonntag umlegen, in diesem Fall werden jedoch stattdessen Zellen mit einer hohen Anzahl an Freizeitmöglichkeiten stark frequentiert, dementsprechend steigt in diesen Gebieten auch der Ladebedarf.

#### 4. Ergebnisse: Öffentliche Ladestationen

Als Beispiel für eine Zelle, die zwar kaum von Berufspendlern oder zum Einkaufszweck aufgesucht wird, jedoch eine vergleichsweise hohe Anzahl an Freizeitmöglichkeiten (siehe 3.3.1) aufweist, wird Zelle 25 (Kaumberg) betrachtet. In Abbildung 4.7 wird für diese Zelle die optimierte Anzahl an öffentlichen 22 kW Ladesäulen für unterschiedliche Wochentage und Elektrifizierungsstufen aufgezeigt. Wie man sieht tritt (für 100%, 50% und 10% EV-Anteil gleichermaßen), fast der sämtliche Ladebedarf dieser Zelle am Sonntag auf. Damit der Energiebedarf in Zelle 25 jederzeit gedeckt werden kann, ist also das die ausschlaggebende Zahl an öffentlichen Ladesäulen, die installiert sein muss.

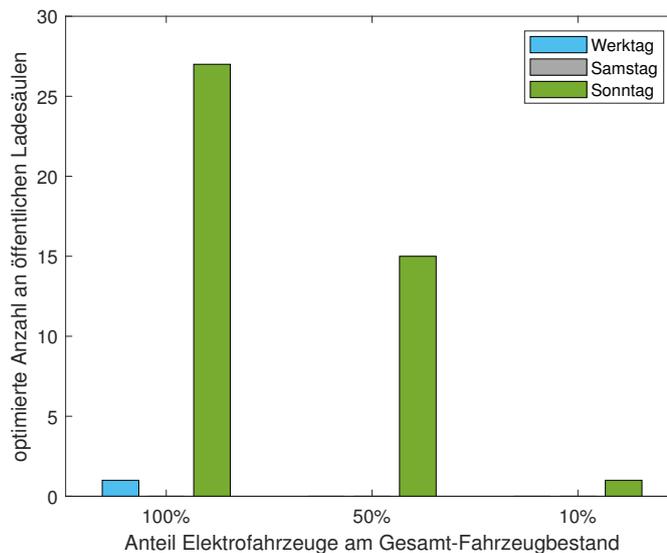


Abbildung 4.7.: optimierte Anzahl an öffentlichen Ladesäulen für Zelle 25 an unterschiedlichen Wochentagen, für unterschiedliche EV-Anteile

Ein ganz anderes Verhalten weist hingegen, die als „Industrie“ (siehe 3.2) kategorisierte Zelle 14 (Böheimkirchen und Kirchstetten) auf. Die optimierte Anzahl an öffentlichen Ladesäulen an unterschiedlichen Wochentagen und für unterschiedliche Elektrifizierungsstufen ist für diese Zelle in Abbildung 4.8 dargestellt. Betrachtet man den Fall eines 100%igen EV-Anteils, werden an einem Werktag deutlich mehr Ladesäulen benötigt als an den Wochenendtagen. Dieser Umstand begründet sich, wie bereits erwähnt, durch die vielen Berufseinpender und gleichzeitig einer nicht vernachlässigbar hohen Zahl an Einwohnern ohne private Ladeinfrastruktur. Für einen EV-Anteil von 50% und vor allem 10% werden die Unterschiede zwischen den Wochentagen geringer, was aber auch auf die generell niedrige Zahl an öffentlichen Ladesäulen zurückzuführen ist.

## 4.2. Einfluss des Wochentages

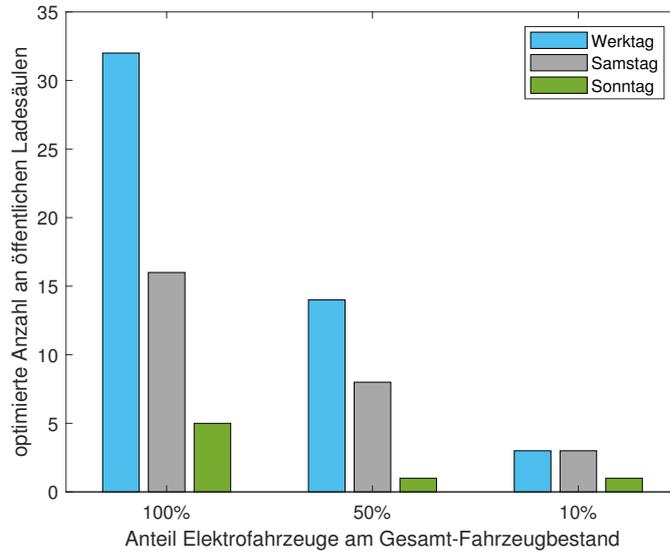


Abbildung 4.8.: optimierte Anzahl an öffentlichen Ladesäulen für Zelle 14 an unterschiedlichen Wochentagen, für unterschiedliche EV-Anteile

Als weiteres Beispiel wird Zelle 18 (Wilhelmsburg) ausgewählt. Die Darstellung der optimierten Anzahl öffentlicher Ladesäulen für alle Wochentage und Elektrifizierungsstufen ist Abbildung 4.9 zu entnehmen. Im Vergleich zu den zwei Beispielen zuvor, ist in diesem Fall der Unterschied zwischen dem errechneten Optimum für einen Werktag und Samstag, für alle Elektrofahrzeuganteile gering. Sonntags ist der Ladebedarf zwar niedriger aber trotzdem nicht vernachlässigbar klein. Dieser Umstand könnte darauf zurück zu führen sein, dass ein Großteil der Ladevorgänge, die in dieser Zelle erfolgen, zur Deckung des Energiebedarfs der Einwohner dienen. Zelle 18 zeichnet sich weder durch eine hohe Zahl an Einpendlern aus, noch klassifiziert sie sich als eine der Haupteinkaufs- bzw. Freizeitzellen. Der, durch Pendler und Einkaufs- bzw. Freizeitfahrten entstehende zusätzliche Bedarf, wird somit als unwesentlich angenommen.

#### 4. Ergebnisse: Öffentliche Ladestationen

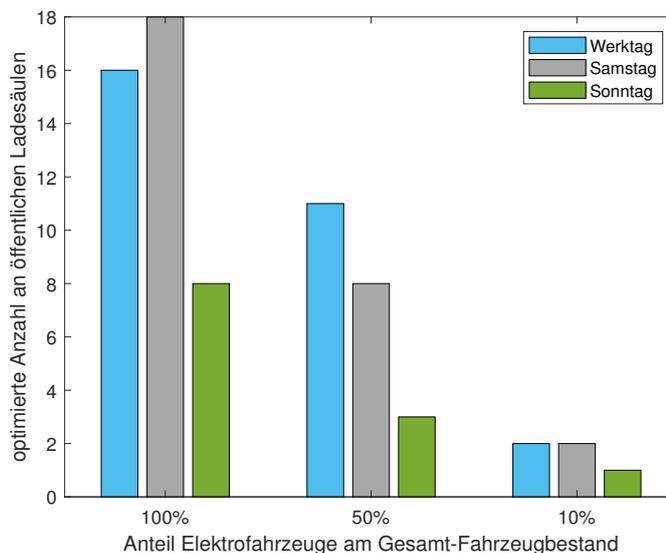


Abbildung 4.9.: optimierte Anzahl an öffentlichen Ladesäulen für Zelle 18 an unterschiedlichen Wochentagen, für unterschiedliche EV-Anteile

### 4.3. Einfluss der Bevölkerungsdichte

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Bevölkerungsdichte auf die Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladestationen für unterschiedliche Elektrofahrzeuganteile untersucht.

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, werden im Rahmen dieser Arbeit, die einzelnen Zellen, unter anderem basierend auf ihrer Bevölkerungsdichte, einer der vier Kategorien (Land, kleine Gemeinde, Industrie und Stadt) zugeordnet. Alle weiteren Klassifikationen, die das Ladeverhalten und die Ladeinfrastruktur betreffen, erfolgen auf Basis dieser Zuordnung. Demgemäß werden in diesem Abschnitt die Unterschiede zwischen Zellen unterschiedlicher Kategorien (die, die Bevölkerungsdichte widerspiegeln) aufgezeigt.

Wie in Abschnitt 4.1 bereits festgehalten, steigt die Gesamtzahl der, zur Deckung des Energiebedarfs notwendigen, öffentlichen Ladesäulen, linear mit steigender Elektrifizierung des privaten Individualverkehrs. Dieses Wachstum der Ladeinfrastruktur erfolgt jedoch nicht für alle Zellen gleichermaßen.

In Abbildung 4.10 wird die durchschnittliche Anzahl an öffentlichen Ladesäulen der vier Kategorien abhängig vom Elektrofahrzeuganteil am Gesamt-Fahrzeugbestand präsentiert. Dazu wird pro Kategorie (Land, kleine Gemeinde, Industrie, Stadt) der Mittelwert der Ergebnisse aller Zellen, die dieser Kategorie entsprechen, gebildet. Da die Kategorie „Stadt“ nur ein Mal für Zelle 13 (St. Pölten) vergeben wurde, entspricht in diesem Fall der Durchschnitt der tatsächlichen Anzahl der Ladesäulen in Zelle 13.

### 4.3. Einfluss der Bevölkerungsdichte

Wie man der Abbildung entnehmen kann, verläuft das Wachstum der, zur Deckung des Ladebedarfs benötigten Ladestationen, für die Kategorie „Stadt“, also ein Gebiet mit hoher Bevölkerungsdichte am steilsten. Zur besseren Darstellung der anderen drei Kategorien wird in Abbildung 4.10 (b), die Kategorie Stadt ausgeblendet. Es ist nun deutlich zu erkennen, dass mit steigender Bevölkerungsdichte, sowohl die durchschnittliche Anzahl der öffentlichen Ladestationen zunimmt, als auch das, mit vermehrter Elektrifizierung einhergehende, Wachstum der Ladeinfrastruktur.

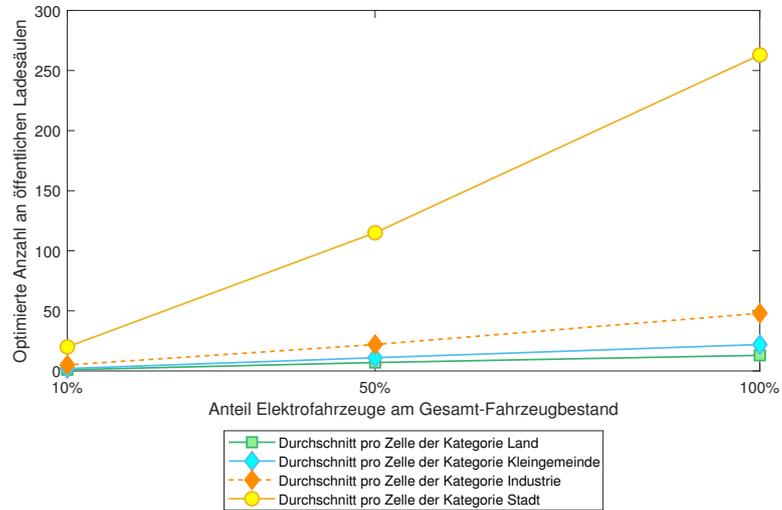
In Abbildung 4.11 wird nun die Summe aller öffentlichen Ladesäulen der vier Kategorien betrachtet. Auch in diesem Fall stellt die Summe aller Zellen der Kategorie Stadt, die tatsächliche Anzahl der Ladesäulen in Zelle 13 dar, da diese Kategorie lediglich für diese eine Zelle vergeben wurde. Betrachtet man also die gesamte Anzahl an Ladesäulen, fällt auf, dass sich die meisten in Gebieten, die als „Industrie“ kategorisiert werden befinden. Wie bereits im vorigen Abschnitt (4.2) veranschaulicht, tritt in diesen Zellen, vor allem an Werktagen, ein hoher Energiebedarf auf.

In Zellen, die als „Land“ bzw. „kleine Gemeinde“ deklariert werden, ist dagegen der summierte Ladebedarf gering. So werden im Falle einer 10%igen Elektrifizierung in allen Zellen der Kategorie „Land“, lediglich 9 öffentliche Ladestationen erforderlich. In Zellen der Kategorie „kleine Gemeinde“ sind es 11. Diese Werte steigen zwar mit einem zunehmenden Elektrofahrzeuganteil auf 115 bzw. 151 öffentliche Ladesäulen bei voller Elektrifizierung, bleiben aber weiterhin deutlich unter den Zahlen für „Stadt“- bzw. „Industrie“-Zellen. Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, liegt dieser Umstand an der hohen Zahl privater Lademöglichkeiten der Bewohner, bei gleichzeitig geringer öffentlicher Ladepräferenz, und vergleichsweise geringer Anzahl an Berufseinspendlern.

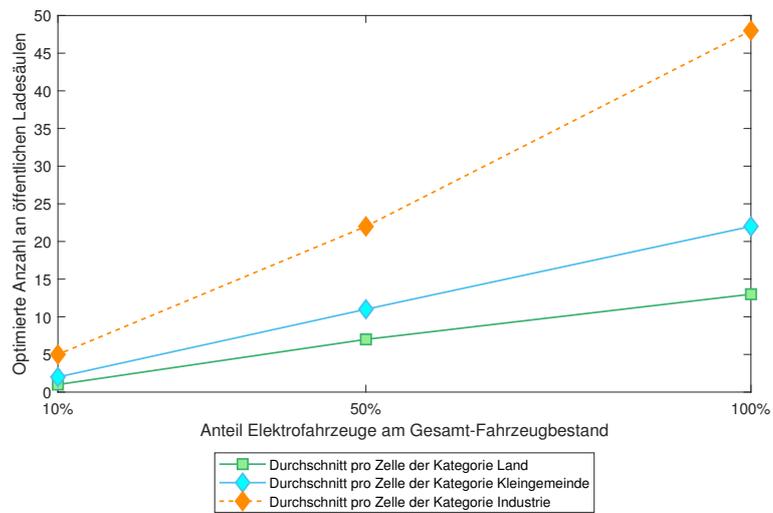
Diese Ergebnisse bestätigen die, in Kapitel 3.4 getroffene Annahme, dass Wohnverhältnisse privater Haushalte entscheidend für das öffentliche Ladeverhalten sind. In stärker besiedelten Gebieten (Zellen der Kategorien Land und Industrie) leben vergleichsweise mehr Menschen in Mehrparteienhäusern mit beschränktem Zugang zu privater Ladeinfrastruktur. In diesen Gebieten wird vermehrt von öffentlichen Lademöglichkeiten Gebrauch gemacht. Dünner besiedelte Gebiete weisen dagegen einen deutlich niedrigeren Ladebedarf auf, da ihre Bewohner zum Großteil das private Laden am eigenen Grundstück bevorzugen.

Zu beachten ist, dass diese Überlegungen auf dem Status quo aufbauen. Während heute der private Ladezugang meistens Bewohnern von Einfamilienhäusern vorbehalten bleibt, ist davon auszugehen, dass in Zukunft vermehrt auch Garagen- und Stellplätze von neu erbauten Mehrfamilien- bzw. Mehrparteienhäusern mit entsprechender Ladeinfrastruktur ausgerüstet sein werden. Dieser Trend ist bereits heute zu beobachten. Es ist also anzunehmen, dass der Einfluss der Bevölkerungsdichte auf das Ladeverhalten in Zukunft geringer werden wird.

#### 4. Ergebnisse: Öffentliche Ladestationen



(a) Darstellung aller vier Kategorien



(b) Darstellung ohne der Kategorie Stadt

Abbildung 4.10.: Durchschnittliche Anzahl an öffentlichen Ladesäulen aller vier Kategorien (Land, kleine Gemeinde, Industrie, Stadt) abhängig vom Grad der Elektrifizierung

### 4.3. Einfluss der Bevölkerungsdichte

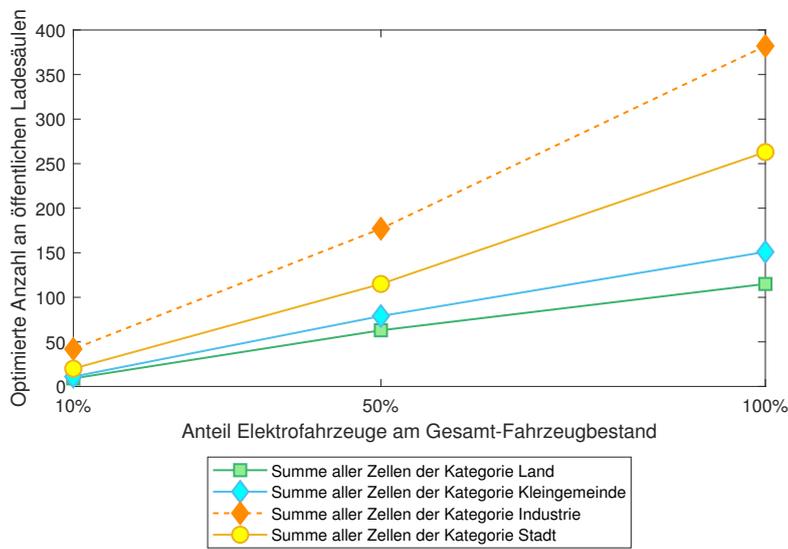


Abbildung 4.11.: Summe aller öffentlichen Ladesäulen der vier Kategorien (Land, kleine Gemeinde, Industrie, Stadt) abhängig vom Grad der Elektrifizierung



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 5. Sensitivitätsanalysen

In diesem Kapitel wird der Einfluss verschiedener Parameter auf das Optimierungsmodell untersucht. Wie bereits in Kapitel 3.5.3 beschrieben, werden insgesamt drei Szenarien der zukünftigen technologischen Entwicklung analysiert. Zwei davon betreffen den technischen Fortschritt der Elektroautos, eines jenen der öffentlichen Ladestationen.

Alle Szenarien werden unter Annahme eines Elektrofahrzeuganteils von 100% für einen Werktag gerechnet. Die entsprechenden Parameter der Fahrten und der Zugang zur Ladeinfrastruktur bleiben gegenüber dem Basismodell unverändert.

Die Ergebnisse werden, sofern nicht anders vermerkt, entsprechend dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Fall B präsentiert.

### 5.1. Technologische Entwicklung der Elektrofahrzeuge

In den folgenden zwei Unterkapiteln wird untersucht, wie sich die technologische Entwicklung der Elektrofahrzeuge auf die optimale Verteilung der öffentlichen Ladeinfrastruktur auswirkt. Dabei wird einerseits der spezifische Energieverbrauch der Fahrzeuge (5.1.1), und andererseits die Batteriekapazität (5.1.2), entsprechend dem zu erwartendem technischen Fortschritt variiert.

#### 5.1.1. Einfluss der Effizienz des Fahrzeuges

In diesem Szenario wird der Einfluss des spezifischen Energieverbrauchs der Fahrzeuge auf die optimale Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen untersucht. Dabei werden zwei Modellläufe durchgeführt, für jeweils zwei unterschiedliche Werte des Verbrauchs  $c$ :

1.  $c = 0.15 \text{ kWh/km}$
2.  $c = 0.10 \text{ kWh/km}$

## 5. Sensitivitätsanalysen

und im folgenden mit dem Referenzszenario ( $c = 0.20 \text{ kWh/km}$ ) verglichen. Dadurch können auch Aussagen über mögliche technologische Durchbrüche in Zukunft (Halbierung des Energieverbrauchs pro Kilometer) getroffen werden.

Die Ergebnisse der Optimierung aller drei Szenarien sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Auf den ersten Blick lässt sich sofort erkennen, dass mit steigender Effizienz der Fahrzeuge, wie erwartet, weniger öffentliche Ladesäulen notwendig werden. Insgesamt wird, laut den Ergebnissen des Optimierungsmodells, im gesamten Gebiet die folgende Zahl an öffentlichen 22 kW Ladesäulen benötigt, um den auftretenden Energiebedarf zu decken:

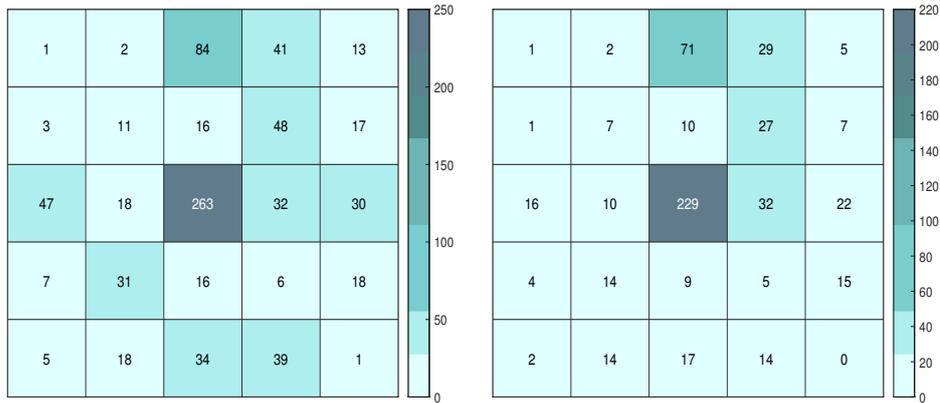
- Referenzszenario: **801 Ladesäulen**
- Szenario  $c = 0.15 \text{ kWh/km}$ : **563 Ladesäulen**
- Szenario  $c = 0.10 \text{ kWh/km}$ : **366 Ladesäulen**

Mit einer Verdoppelung der Effizienz des Elektroautos sinkt somit der notwendige Ausbau öffentlicher Ladeinfrastruktur um mehr als die Hälfte. Dieser Rückgang erfolgt jedoch nicht in allen Zellen gleich. Im Folgenden wird der Einfluss auf unterschiedliche Gebiete genauer untersucht.

In Abbildung 5.2 wird jeweils die durchschnittliche Anzahl öffentlicher Ladesäulen der vier Kategorien (Land, kleine Gemeinde, Industrie und Stadt) in Abhängigkeit vom spezifischen Energieverbrauch der Elektrofahrzeuge dargestellt. Da die Kategorie „Stadt“ nur ein Mal für Zelle 13 (St. Pölten) vergeben wurde, entspricht in diesem Fall der Durchschnitt, der tatsächlichen Zahl an Ladesäulen in Zelle 13.

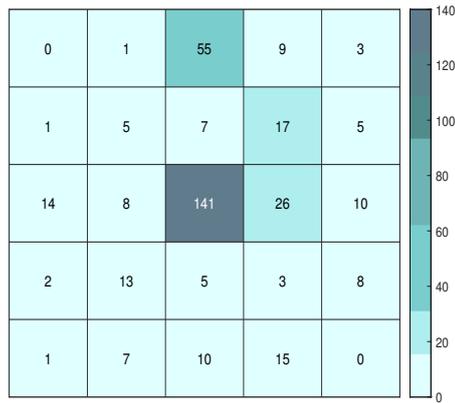
Wie man sieht hat eine Steigerung der Effizienz vor allem Auswirkung auf die öffentliche Ladeinfrastruktur städtischer Gebiete. Während der Unterschied zwischen dem Referenzszenario und jenem für einen Verbrauch von  $c = 0.15 \text{ kWh}$  nur 13% ausmacht, sinkt die notwendige Anzahl an Ladesäulen bei erneuter Reduktion des Verbrauchs auf  $c = 0.10 \text{ kWh}$  um weitere 38%. Interessanterweise ist bei Zellen der anderen drei Kategorien ein anderes Verhalten zu beobachten. Zur besseren Darstellung wird in Abbildung 5.2 (b) die Kategorie „Stadt“ ausgeblendet. Damit wird sichtbar, dass vor allem in Zellen der Kategorie „Industrie“ schon eine geringe Minderung des Energieverbrauchs einen relativ großen Unterschied ausmacht. Eine weitere Reduktion im Energieverbrauch, wirkt sich dagegen weniger stark auf die Ergebnisse aus. Da die durchschnittliche Anzahl der Ladesäulen in Zellen der Kategorie „Land“ schon im Referenzszenario gering war, hat eine erhöhte Effizienz der Fahrzeuge in diesen Gebieten keine großen Auswirkungen.

## 5.1. Technologische Entwicklung der Elektrofahrzeuge



(a) Ausgangsszenario: 0.2 kWh/km

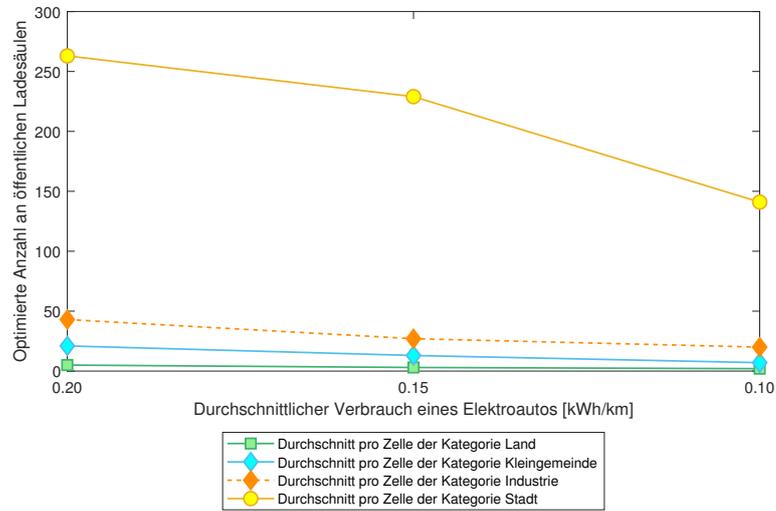
(b) 0.15 kWh/km



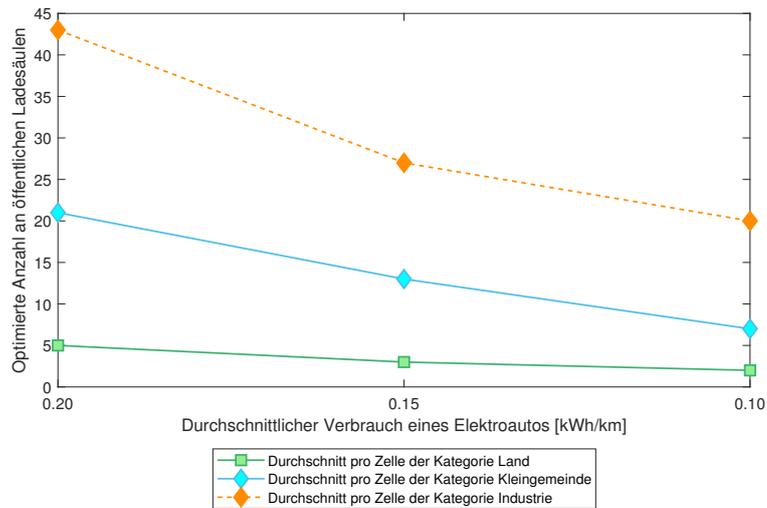
(c) 0.10 kWh/km

Abbildung 5.1.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen für einen Elektrofahrzeuganteil von 100%, Ergebnisse für einen Werktag, Variation des spezifischen Energieverbrauchs der Elektrofahrzeuge

## 5. Sensitivitätsanalysen



(a) Darstellung aller vier Kategorien



(b) Darstellung ohne der Kategorie Stadt

Abbildung 5.2.: Durchschnittliche Anzahl öffentlicher Ladesäulen der vier Kategorien (Land, kleine Gemeinde, Industrie, Stadt) in Abhängigkeit vom spezifischen Energieverbrauch der Elektrofahrzeuge

### 5.1.2. Einfluss der Batteriekapazität des Fahrzeuges

Dieses Szenario untersucht, welchen Einfluss eine Steigerung der Batteriekapazität auf die Ergebnisse des Optimierungsmodells hat. Als mögliche Größen der Batteriekapazität werden der doppelte und dreifache Wert des Referenzszenarios (42.2 kWh) herangezogen. Wie zuvor, sollen dadurch große technologische Fortschritte, diesmal in der Speichertechnologie, betrachtet werden.

1. *battery* = 84.40 kWh
2. *battery* = 126.60 kWh

Die Ergebnisse dieser Szenarien sind Abbildung 5.3 zu entnehmen. Dabei ist zu sehen, dass eine Vergrößerung der Batteriekapazität keine Auswirkung auf die gesamte Anzahl öffentlicher Ladesäulen im Gebiet hat. Es ist jedoch eine Änderung in der räumlichen Verteilung erkennbar.

Diese Unterschiede in der Verteilung zwischen Zellen unterschiedlicher Kategorien, werden in Abbildung 5.4 präsentiert. Dazu werden für jede der vier Kategorien, die Ladesäulen aller Zellen, die dieser Kategorie entsprechen, summiert. Wie man sieht bleibt die Gesamtzahl der öffentlichen Ladesäulen für alle drei Szenarien annähernd konstant. Die Unterschiede machen sich vor allem in der Aufteilung zwischen Zellen der Kategorie „Stadt“ und „Industrie“ bemerkbar.

Der Einfluss der Batteriekapazität spielt folglich keine große Rolle. Verantwortlich hierfür ist die Nebenbedingung 3.10, die sicher stellt, dass jedes Fahrzeug am Ende des letzten Zeitintervalls wieder seinen Initial-Ladezustand aufweist. Bleibt der Verbrauch konstant, ändert sich auch die geladene Energiemenge nicht. Würde diese Nebenbedingung entfallen und würde die Modellierung für einen größeren Zeitraum als einen Tag durchgeführt werden, wären womöglich weniger Ladevorgänge notwendig, und die Anzahl der benötigten Säulen geringer. Da im Rahmen dieser Arbeit aber nur ein geografisch kleines Gebiet betrachtet wird, sind die zurückgelegten Distanzen relativ kurz und die im Referenzszenario angenommene Batteriekapazität bereits ausreichend groß um die Strecken ohne häufiges öffentliches Laden zurück zu legen. Das allgemein bekannte Problem der geringen Reichweite von Elektrofahrzeugen, spielt somit in diesem Kontext eine untergeordnete Rolle.

## 5. Sensitivitätsanalysen

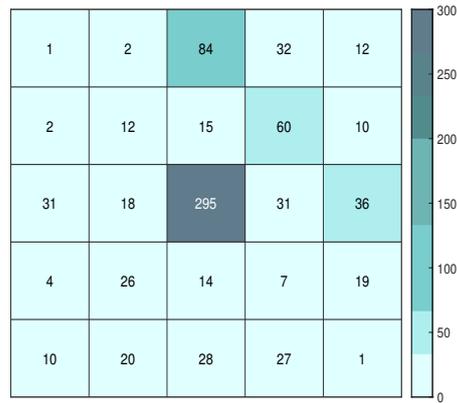
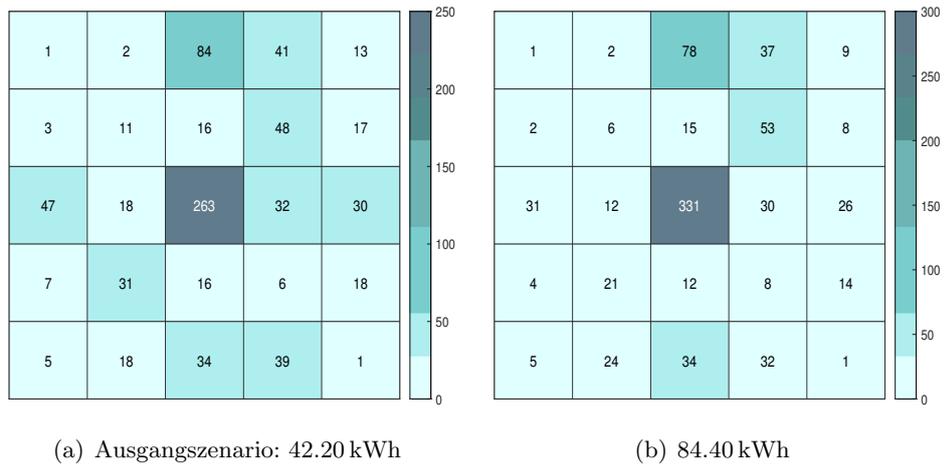


Abbildung 5.3.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen für einen Elektrofahrzeuganteil von 100%, Ergebnisse für einen Werktag, Variation der Batteriekapazität der Elektrofahrzeuge

## 5.1. Technologische Entwicklung der Elektrofahrzeuge

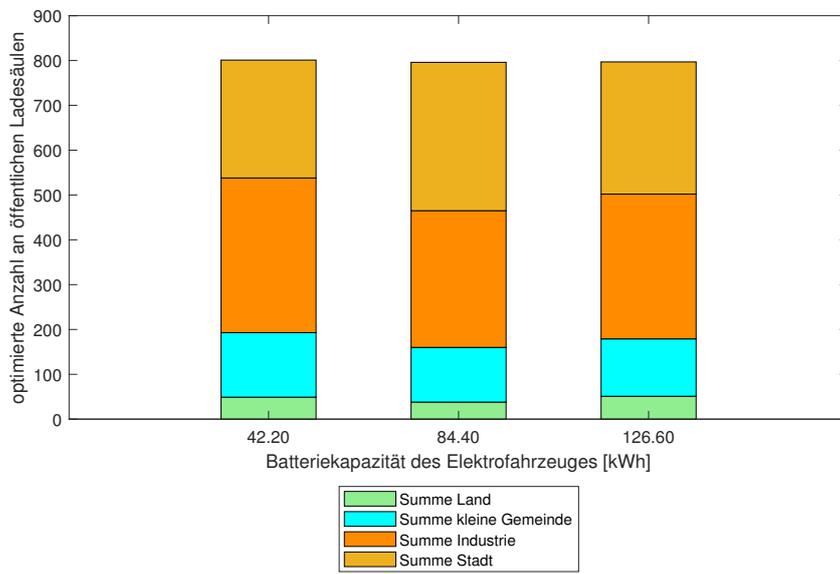


Abbildung 5.4.: Optimierte Anzahl öffentlicher Ladesäulen in Abhängigkeit von der Batteriekapazität der Elektrofahrzeuge

## 5. Sensitivitätsanalysen

### 5.2. Technologische Entwicklung der Ladesäulen

In diesem Szenario wird die technologische Entwicklung öffentlicher Ladesäulen untersucht. Dabei wird die Ladeleistung der Ladesäulen zuerst auf den dreifachen und im zweiten Modelllauf auf sechsfachen Wert des Referenzszenarios (22 kW) erhöht:

1.  $power^{public,max} = 66 \text{ kW}$
2.  $power^{public,max} = 132 \text{ kW}$

Wie erwartet, führt eine Erhöhung der Ladeleistung dazu, dass deutlich weniger öffentliche Ladesäulen im gesamten Modellgebiet notwendig sind. Diese Ergebnisse werden in Abbildung 5.5 präsentiert.

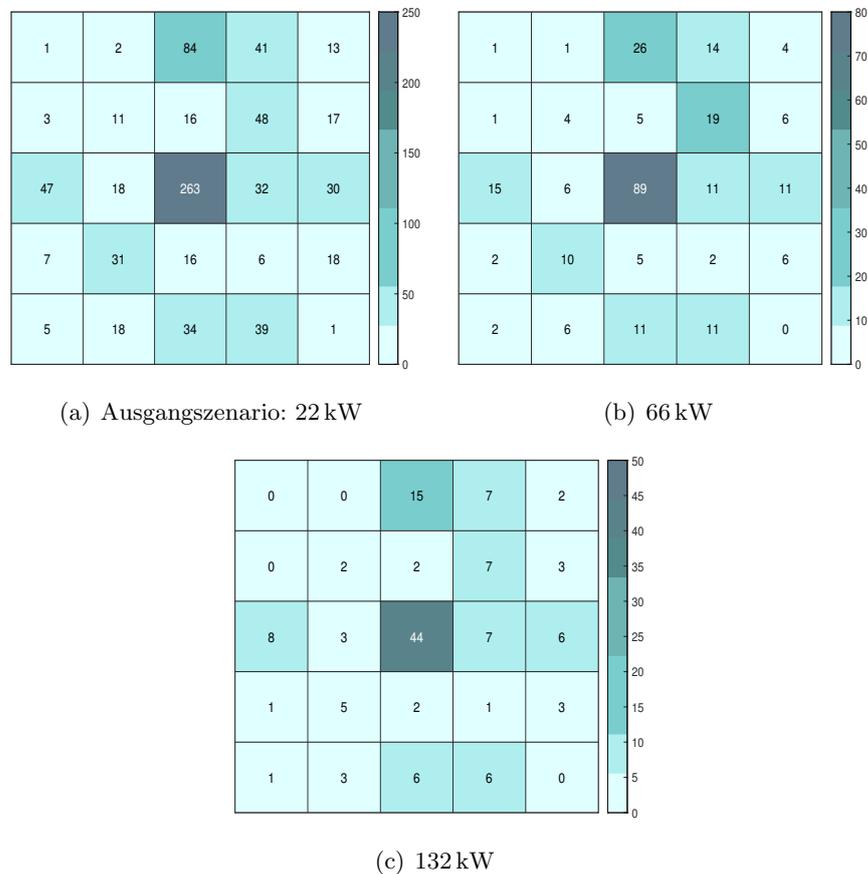


Abbildung 5.5.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen für einen Elektrofahrzeuganteil von 100%, Ergebnisse für einen Werktag, Variation der Ladeleistung öffentlicher Ladesäulen

## 5.2. Technologische Entwicklung der Ladesäulen

Insgesamt sinkt, bei gleichbleibender geladener Energiemenge, die Anzahl der öffentlichen Ladesäulen von 801 (Referenzszenario) auf 268 bei einer Ladeleistung von 66 kW und dann nochmals auf 134 für Ladeleistungen von 132 kW.

Eine Erhöhung der Ladeleistung senkt die Ladedauer und erhöht somit die Anzahl der Fahrzeuge, die in einer Stunde geladen werden können.

Dieser Effekt wird im Folgenden wieder für Zellen unterschiedlicher Kategorien untersucht. In Abbildung 5.6 wird die Summe aller öffentlichen Ladesäulen der vier Kategorien und die Summe über alle Zellen in Abhängigkeit von der Ladeleistung dargestellt. Wie man sieht zeigen alle vier Kategorien das selbe Verhalten auf. Während die erforderliche öffentliche Ladeinfrastruktur zwischen dem Referenzszenario und jenem für eine Ladeleistung von 66 kW stark zurück geht, flacht diese Abnahme im Vergleich zum 132 kW-Szenario ab. Dieser Zusammenhang wird auch deutlich, wenn man die Modellergebnisse für jeweils eine durchschnittliche Zelle der vier Kategorien betrachtet (Abbildung 5.7). Hier sieht man auch deutlich, dass der Einfluss der Steigerung der Ladeleistung umso stärker ist, je größer die Bevölkerungsdichte des Gebietes.

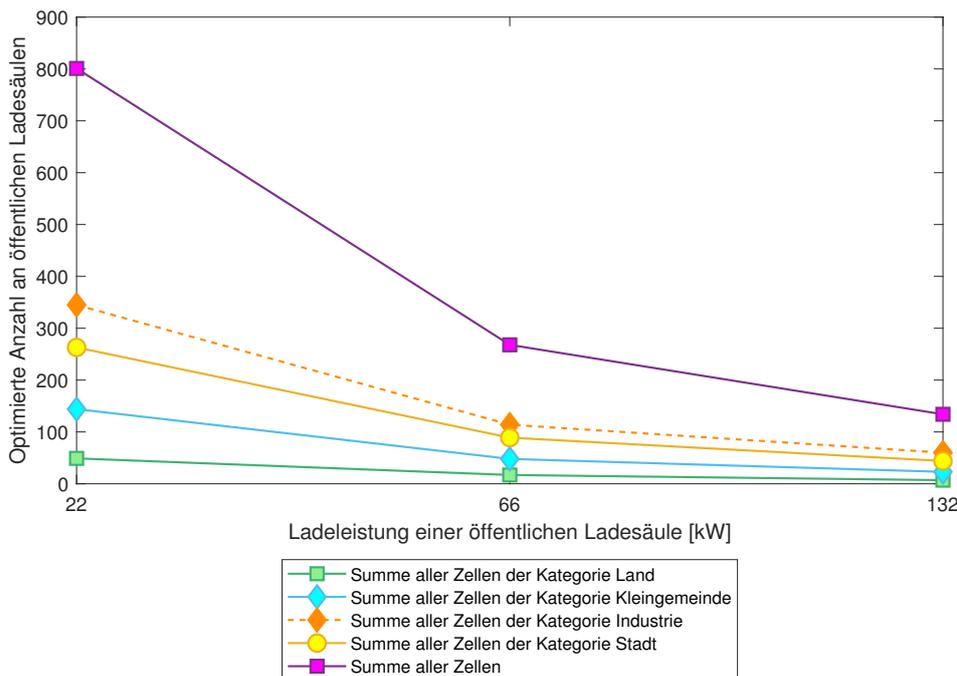
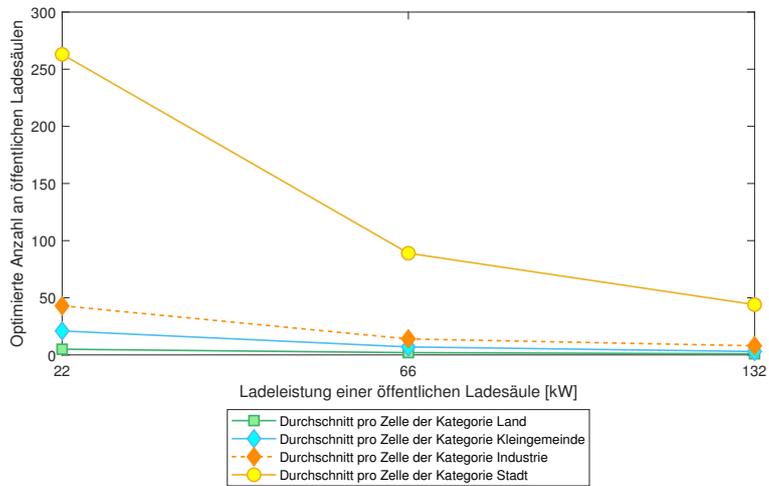
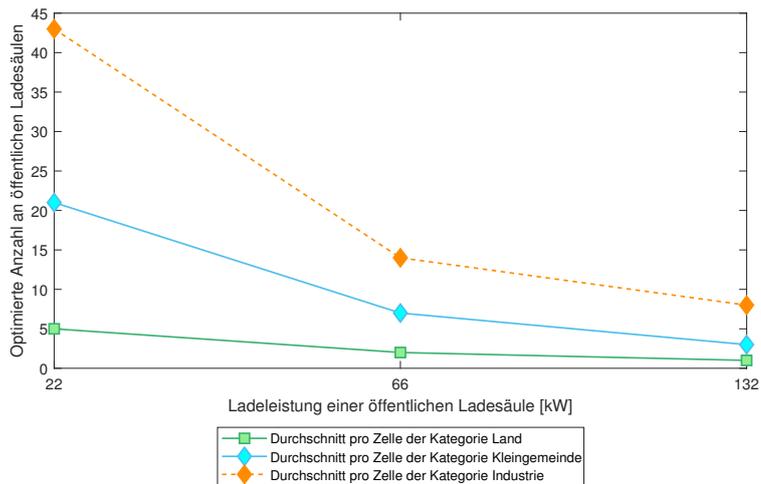


Abbildung 5.6.: Summe aller öffentlichen Ladesäulen der vier Kategorien (Land, kleine Gemeinde, Industrie, Stadt) in Abhängigkeit von der Ladeleistung öffentlicher Ladesäulen

## 5. Sensitivitätsanalysen



(a) Darstellung aller vier Kategorien



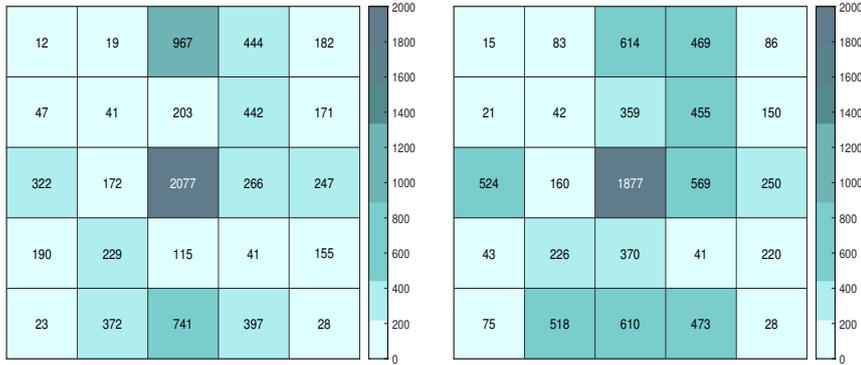
(b) Darstellung ohne der Kategorie Stadt

Abbildung 5.7.: Durchschnittliche Anzahl an öffentlichen Ladesäulen aller vier Kategorien (Land, kleine Gemeinde, Industrie, Stadt) in Abhängigkeit von der Ladeleistung öffentlicher Ladesäulen

Betrachtet man für dieses Szenario jedoch zusätzlich die Ergebnisse von Fall A (siehe Kapitel 4.1), ist aus Abbildung 5.8 ersichtlich, dass die Anzahl der notwendigen Ladepunkte mit steigender Ladeleistung nicht auffallend zurück geht. In diesem Fall wird

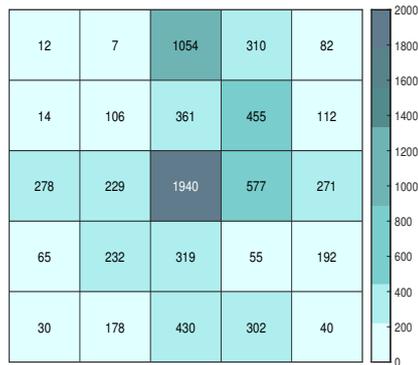
## 5.2. Technologische Entwicklung der Ladesäulen

angenommen, dass alle Fahrzeuge gleichzeitig innerhalb des vierstündigen Zeitintervalls laden. Damit wird der Zeitgewinn durchs Laden mit höherer Leistung nicht berücksichtigt und es werden unabhängig von der Ladeleistung annähernd gleich viele Säulen notwendig um den Ladebedarf zu decken.



(a) Ausgangsszenario: 22 kW

(b) 66 kW



(c) 132 kW

Abbildung 5.8.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen für einen Elektrofahrzeuganteil von 100%, Ergebnisse für einen Werktag, ermittelt über Fall A, Variation der Ladeleistung öffentlicher Ladesäulen



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 6. Schlussfolgerungen

Der in Zukunft zu erwartende starke Zuwachs an Elektromobilität erfordert eine gut ausgebaute flächendeckende Ladeinfrastruktur, um den entstehenden Energiebedarf decken zu können und gleichzeitig eine gewisse „Ladesicherheit“ zu gewährleisten. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Optimierungsmodell zeigt einen Ansatz für die Planung der optimalen Allokation öffentlicher Ladestationen zur Deckung des Ladebedarfs des privaten Individualverkehrs.

Die präsentierten Ergebnisse erlauben Prognosen über den zukünftigen Ausbau der Ladeinfrastruktur im betrachteten Gebiet zu stellen. Dabei ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen steigender Bevölkerungsdichte und der Dichte öffentlicher Ladestationen zu erkennen. In schwächer besiedelten, ländlichen Gebieten ist sowohl die Anzahl der öffentlichen Ladestationen, als auch das, mit vermehrter Elektrifizierung einhergehende, Wachstum der Ladeinfrastruktur gering. Je städtischer dagegen eine Region, desto größer ist der zu erwartende Ladebedarf in den nächsten Jahren. Das begründet sich einerseits in den unterschiedlichen Wohnverhältnissen zwischen Stadt und Land und damit einhergehend abweichenden Möglichkeiten für das private Laden. Andererseits sind diese Regionen attraktive Pendlerziele mit erhöhtem Verkehrsaufkommen.

Aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalysen geht hervor, dass technologische Entwicklungen hinsichtlich der Effizienz der Elektroautos eine große Auswirkung auf den notwendigen Ladeinfrastrukturausbau haben. So kann durch eine Verdoppelung der Effizienz, der notwendige Ausbau für einen Elektrofahrzeuganteil von 100%, um die Hälfte gesenkt werden. Dieser Trend ist auch bei einer Erhöhung der Ladeleistung öffentlicher Ladesäulen zu erwarten. Durch diese technologische Entwicklung kann die Ladedauer erheblich gesenkt werden, was wiederum die Anzahl der Fahrzeuge, die innerhalb einer Stunde geladen werden können, erhöht. Zu beachten ist jedoch, dass höhere Ladeleistungen eher nur an Orten notwendig werden, an denen ohnehin nur kurz geladen wird. Da die zurückgelegten Distanzen der betrachteten Fahrten klein sind, wirken sich dagegen technologische Entwicklungen der Batteriekapazität, die eine größere Reichweite der Elektrofahrzeuge ermöglichen, kaum auf die Ergebnisse des Modells aus. Würden auch Fahrten, die über die Modellregion hinaus gehen in Betracht gezogen werden, wäre das jedoch sicherlich ein weiterer Faktor der zur Minimierung der notwendigen Infrastruktur beitragen würde.

## 6. Schlussfolgerungen

Abschließend lässt sich sagen, dass die Ergebnisse des betrachteten Optimierungsmodells die erwarteten Annahmen über die Entwicklung der notwendigen Ladeinfrastruktur bestätigt. Die doch deutlichen Unterschiede zwischen ländlichen und urbaneren Gebieten weisen jedoch auf eine notwendige noch genauere Kategorisierung der Gebiete hin. Neben dieser erhöhten geografischen Auflösung, könnten sich zukünftige Arbeiten auch mit kleineren betrachteten Zeitfenstern beschäftigen. Durch die Verkleinerung der betrachteten Zellen kann einerseits eine präzisere geografische Verortung der Ladesäulen berechnet werden. Andererseits ermöglichen kürzere Zeitintervalle eine genauere Modellierung der Fahrtmuster, was wiederum zu genaueren Optimierungsergebnissen führt.

Zu beachten ist darüber hinaus, dass alle getroffenen Annahmen zur Festlegung der Fahrten auf Statistiken fossiler Fahrzeuge beruhen. Es ist jedoch anzunehmen, dass es durch den Zuwachs der Elektromobilität auch zu Veränderungen im Fahrverhalten kommen wird. Das ist jedenfalls ein Punkt, an dem zukünftige Arbeiten ansetzen können. Hier wären vor allem auch Sozialwissenschaften gefordert, Fahrverhalten von Bewohnern zu analysieren um so eine optimale Infrastrukturplanung zu ermöglichen.

Darüber hinaus könnten Modelle erstellt werden, die über den privaten Individualverkehr hinausgehen und auch andere Sektoren wie den gewerblichen Verkehr (Dienstfahrzeuge, Klein-LKW's etc.) miteinbeziehen. Ebenso Fahrten, die in das Gebiet hinein bzw. hinausführen und Bewegungen innerhalb der einzelnen Zellen, könnten in weiteren Arbeiten erfasst werden.

## Literatur

- [1] Europäische Kommission. *Energiefahrplan 2050: ein sicherer, wettbewerbsfähiger und CO<sub>2</sub>-armer Energiesektor ist möglich*. URL: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP\\_11\\_1543](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_11_1543). abgerufen am 30.05.2020 (siehe S. 1).
- [2] Umweltbundesamt. *Umweltbundesamt: Verkehr beeinflusst das Klima*. URL: [https://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/auswirkungen\\_verkehr/verk\\_treibhausgase/](https://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/auswirkungen_verkehr/verk_treibhausgase/). abgerufen am 29.05.2020 (siehe S. 1).
- [3] Umweltbundesamt. *Umweltbundesamt: Treibhausgase*. URL: <https://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/treibhausgase/?tempL=1%2F>. abgerufen am 30.05.2020 (siehe S. 1).
- [4] Umweltbundesamt. *Umweltbundesamt: Energiewende im Verkehr*. URL: [https://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/auswirkungen\\_verkehr/energiewende\\_im\\_verkehr/](https://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/auswirkungen_verkehr/energiewende_im_verkehr/). abgerufen am 30.05.2020 (siehe S. 1).
- [5] Thomas Krutzler. *Energiewirtschaftliche Szenarien im Hinblick auf die Klimaziele 2030 & 2050*. Techn. Ber. (siehe S. 1).
- [6] Statistik Austria. *Kraftfahrzeuge - Bestand*. URL: [https://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/energie\\_umwelt\\_innovation\\_mobilitaet/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge\\_-\\_bestand/index.html](https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html). abgerufen am 30.05.2020 (siehe S. 1, 5).
- [7] AustriaTech. *Mobilitätsdaten in Österreich / Zahlen, Daten und Fakten April 2020*. URL: [https://www.austriatech.at/assets/Uploads/Publikationen/PDF-Dateien/71e523059e/ZahlenDatenFakten\\_2020\\_04\\_D.pdf](https://www.austriatech.at/assets/Uploads/Publikationen/PDF-Dateien/71e523059e/ZahlenDatenFakten_2020_04_D.pdf). abgerufen am 30.05.2020 (siehe S. 5, 39).
- [8] Bundesverband Elektromobilität Österreich. *E-Autos in Österreich, BEÖ - Bundesverband Elektromobilität Österreich*. URL: <https://www.beoe.at/statistik/>. abgerufen am 30.05.2020 (siehe S. 5).
- [9] BMK. *Elektromobilität in Österreich*. URL: [https://www.bmk.gv.at/themen/alternative\\_verkehrskonzepte/elektromobilitaet/emob\\_oesterreich.html](https://www.bmk.gv.at/themen/alternative_verkehrskonzepte/elektromobilitaet/emob_oesterreich.html). abgerufen am 30.05.2020 (siehe S. 5).
- [10] KELAG - Kärntner Elektrizitäts-Aktiengesellschaft. *Statistiken — E-Tankstellen suchen und finden*. URL: <https://e-tankstellen-finder.com/at/de/info/statistics>. abgerufen am 29.05.2020 (siehe S. 5).

## Literatur

- [11] International Energy Agency. *Global EV Outlook 2019*. Forschungspublikation. International Energy Agency. Mai 2019 (siehe S. 5, 6).
- [12] Norwegian Ministry of Petroleum und Energy. *Electricity production - Energifakta Norge*. URL: <https://energifaktanorge.no/en/norsk-energiforsyning/kraftproduksjon/>. abgerufen am 01.06.2020 (siehe S. 6).
- [13] Amt der NÖ Landesregierung. *NÖ Klima- & Energiefahrplan 2020 bis 2030*. URL: [http://www.noe.gv.at/noe/Energie/Energiefahrplan\\_2030.html](http://www.noe.gv.at/noe/Energie/Energiefahrplan_2030.html). abgerufen am 30.05.2020 (siehe S. 6, 8, 28).
- [14] Wanting Lin und Guowei Hua. »The flow capturing location model and algorithm of electric vehicle charging stations«. In: *2015 International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS)*. 2015, S. 1–6 (siehe S. 7).
- [15] H. S. Hayaajneh und M. N. Bani Salim und S. Bashetty und X. Zhang. »Optimal Planning of Battery-Powered Electric Vehicle Charging Station Networks«. In: *2019 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*. 2019, S. 1–4 (siehe S. 7).
- [16] S. Chen und Y. Shi und X. Chen und F. Qi. »Optimal location of electric vehicle charging stations using genetic algorithm«. In: *2015 17th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*. 2015, S. 372–375 (siehe S. 7).
- [17] Ahn Yongjun und Yeo Hwasoo. »An Analytical Planning Model to Estimate the Optimal Density of Charging Stations for Electric Vehicles«. In: *PloS one* 10 (Nov. 2015), e0141307 (siehe S. 7, 8).
- [18] Asamer Johannes und Reinthaler Martin und Ruthmair Mario und Straub Markus und Puchinger Jakob. »Optimizing Charging Station Locations for Urban Taxi Providers«. In: *Transportation Research Part A Policy and Practice* 85 (März 2016), S. 233–246 (siehe S. 8).
- [19] Land Niederösterreich. *Land Niederösterreich - Download von Geodaten und Karten*. URL: <http://www.noe.gv.at/noe/Karten-Geoinformationen/DownloadGeodatenKarten.html>. abgerufen am 10.05.2020 (siehe S. 11, 12).
- [20] Statistik Austria. *Statistik Austria - Gemeindedaten*. URL: <https://www.statistik.at/blickgem/gemList.do?bdl=3>. abgerufen am 22.05.2020 (siehe S. 13, 19, 22).
- [21] Statistik Austria. *Statistik Austria - Erwerbsstatus*. URL: [https://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/menschen\\_und\\_gesellschaft/arbeitsmarkt/erwerbsstatus/index.html](https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/arbeitsmarkt/erwerbsstatus/index.html). abgerufen am 08.06.2020 (siehe S. 17).
- [22] Amt der NÖ Landesregierung. *Ergebnisse der landesweiten Mobilitätserhebung 2013/2014*. Forschungsbericht. 2016 (siehe S. 17, 19).
- [23] Flaticon. URL: <https://www.flaticon.com/de/>. abgerufen am 15.05.2020 (siehe S. 37).

- [24] BMW. *BMW i3: Motoren & Technische Daten* — *BMW.at*. URL: <https://www.bmw.at/de/all-models/bmw-i/i3/2020/bmw-i3-technische-daten.html#tab-0>. abgerufen am 22.05.2020 (siehe S. 39).
- [25] Hyundai. *Hyundai IONIQ Elektro - Technik*. URL: <https://www.hyundai.at/ioniq-elektro/technik>. abgerufen am 06.06.2020 (siehe S. 39).



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Anhang



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Anhang A.

## Zusätzliche Abbildungen

### A.1. Ergebnisse: öffentliche Ladestationen

#### A.1.1. Elektrofahrzeuganteil von 100%

Ergebnisse aller Wochentage ermittelt über Fall A

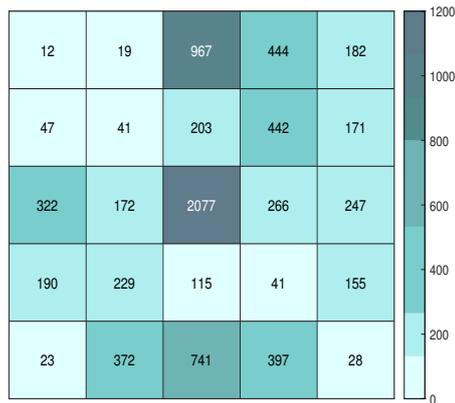


Abbildung A.1.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an einem Werktag für einen Elektrofahrzeuganteil von 100%, ermittelt über Fall A

## Anhang A. Zusätzliche Abbildungen

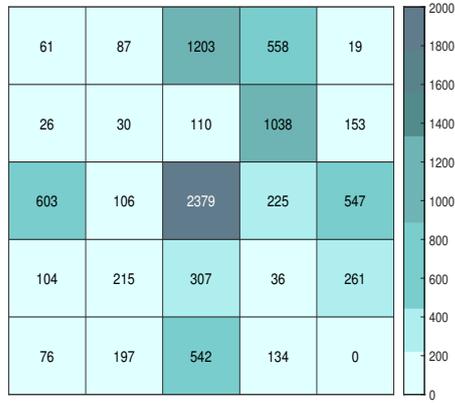


Abbildung A.2.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an einem Samstag für einen Elektrofahrzeuganteil von 100%, ermittelt über Fall A

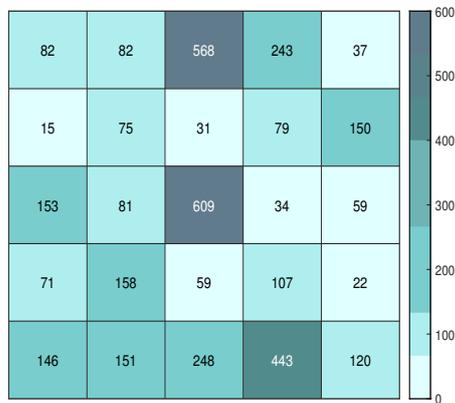


Abbildung A.3.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an einem Sonntag für einen Elektrofahrzeuganteil von 100%, ermittelt über Fall A

## A.1. Ergebnisse: öffentliche Ladestationen

### A.1.2. Elektrofahrzeuganteil von 50%

#### Ergebnisse aller Wochentage ermittelt über Fall A

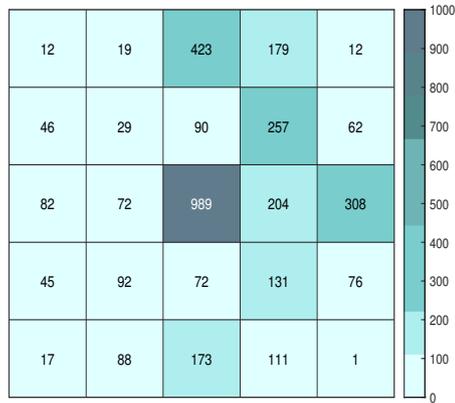


Abbildung A.4.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an einem Werktag für einen Elektrofahrzeuganteil von 50%, ermittelt über Fall A

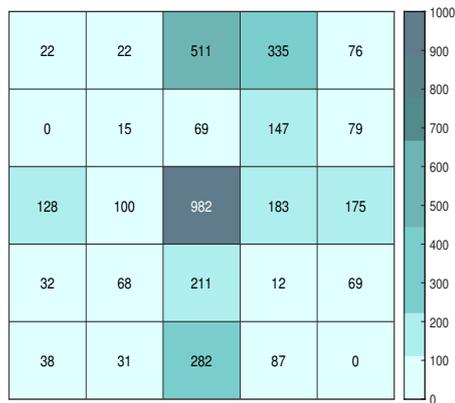


Abbildung A.5.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an einem Samstag für einen Elektrofahrzeuganteil von 50%, ermittelt über Fall A

## Anhang A. Zusätzliche Abbildungen

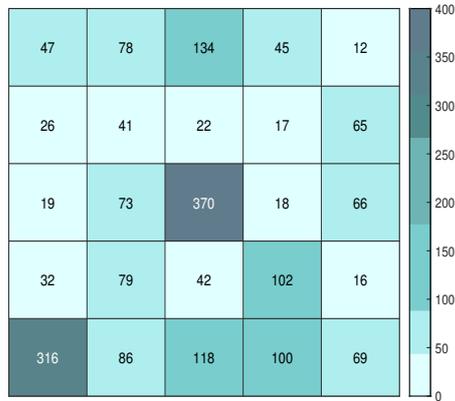


Abbildung A.6.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an einem Sonntag für einen Elektrofahrzeuganteil von 50%, ermittelt über Fall A

### Ergebnisse aller Wochentage ermittelt über Fall B

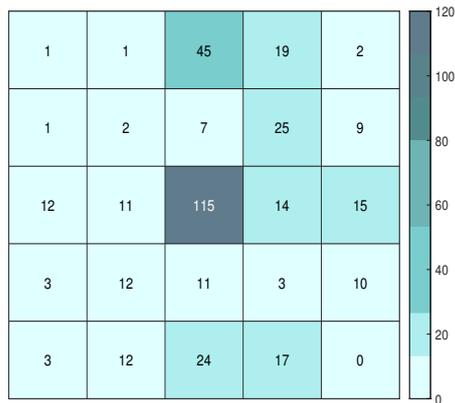


Abbildung A.7.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an einem Werktag für einen Elektrofahrzeuganteil von 50%, ermittelt über Fall B

## A.1. Ergebnisse: öffentliche Ladestationen

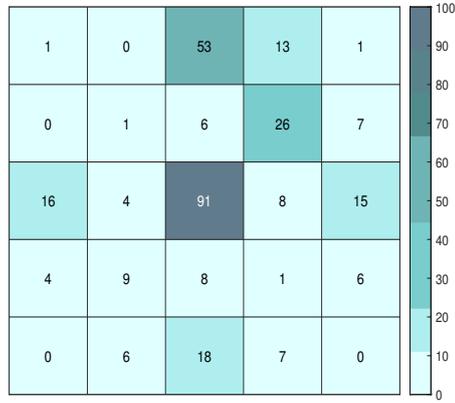


Abbildung A.8.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an einem Samstag für einen Elektrofahrzeuganteil von 50%, ermittelt über Fall B

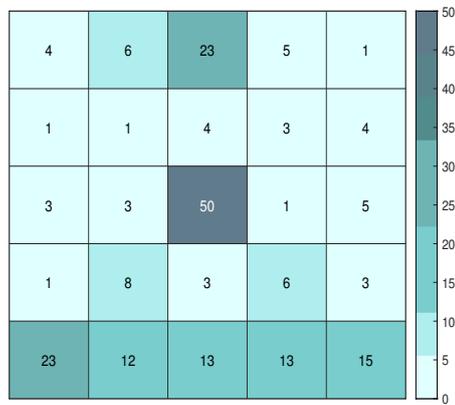


Abbildung A.9.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an einem Sonntag für einen Elektrofahrzeuganteil von 50%, ermittelt über Fall B

Anhang A. Zusätzliche Abbildungen

**A.1.3. Elektrofahrzeuganteil von 10%**

**Ergebnisse aller Wochentage ermittelt über Fall A**

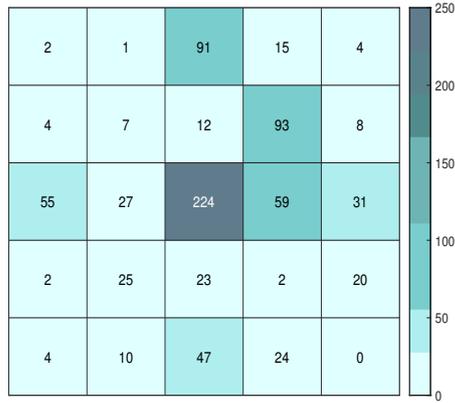


Abbildung A.10.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an einem Werktag für einen Elektrofahrzeuganteil von 10%, ermittelt über Fall A

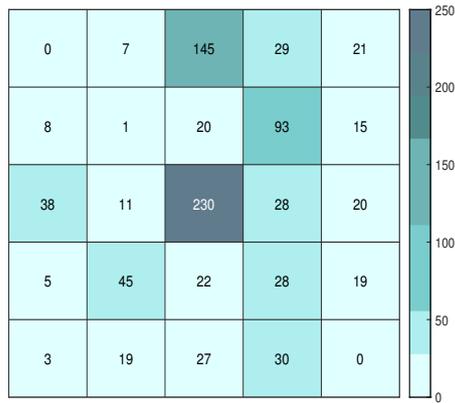


Abbildung A.11.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an einem Samstag für einen Elektrofahrzeuganteil von 10%, ermittelt über Fall A

### A.1. Ergebnisse: öffentliche Ladestationen

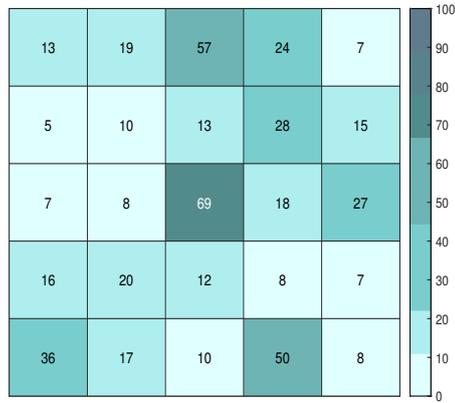


Abbildung A.12.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an einem Sonntag für einen Elektrofahrzeuganteil von 10%, ermittelt über Fall A

### Ergebnisse aller Wochentage ermittelt über Fall B

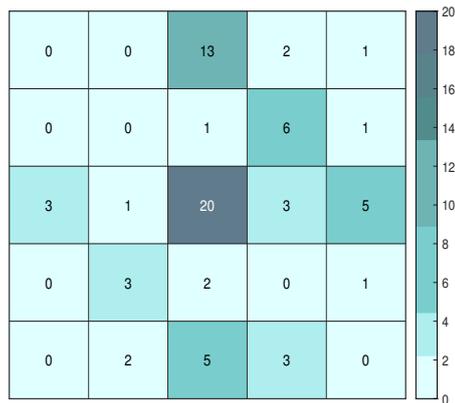


Abbildung A.13.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an einem Werktag für einen Elektrofahrzeuganteil von 10%, ermittelt über Fall B

## Anhang A. Zusätzliche Abbildungen

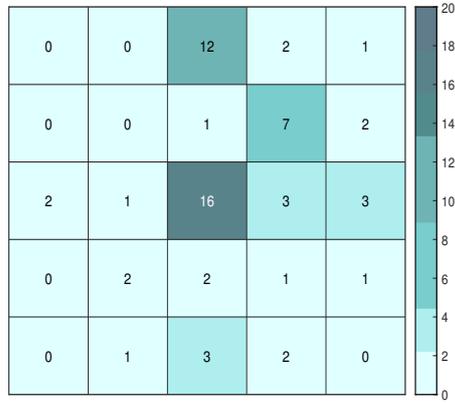


Abbildung A.14.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an einem Samstag für einen Elektrofahrzeuganteil von 10%, ermittelt über Fall B

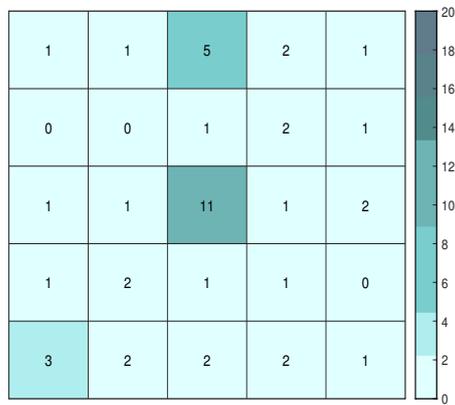


Abbildung A.15.: Optimierte Anzahl und Verteilung öffentlicher Ladesäulen an einem Sonntag für einen Elektrofahrzeuganteil von 10%, ermittelt über Fall B





Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Wien, \_\_\_\_\_  
Date Signature

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Wien, am \_\_\_\_\_  
Datum Unterschrift