Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

Optimale räumliche Verteilung von Ladestationen für Elektromobilität im österreichischen Autobahn- und Schnellstraßennetz

DIPLOMARBEIT

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)

unter der Leitung von

Privatdoz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Johann Auer

und

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Andreas Fleischhacker

eingereicht an der

Technischen Universität Wien

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

von

Dominik Langer, BSc

Mat.Nr.: 1125491

Hackingerstraße 32A/16/12

1140 Wien

Danksagung

Hiermit möchte ich mich ganz herzlich bei meinen beiden Betreuern
Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Johann Auer und Univ. Ass. Dipl.-Ing. Andreas Fleischhacker bedanken, die mich während der gesamten Diplomarbeit zu jeder Zeit bestmöglich unterstützt haben. Eine bessere Betreuung hätte ich mit Sicherheit nicht finden können.
Ein besonderer Dank geht auch an meinen Vater
Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Erasmus Langer, der mich während meines gesamten Studiums finanziell unterstützt hat und mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand.

Kurzfassung

Aufgrund des rasanten Wachstums der Anzahl an Elektrofahrzeugen in Österreich in den letzten Jahren gewinnt das Thema Elektromobilität immer mehr an Bedeutung. Diese Entwicklung bringt neben ihren unumstrittenen Vorteilen auch einige Herausforderungen mit sich, die jeweils geeignete Lösungsansätze benötigen. Eine der wohl größten Herausforderungen in diesem Zusammenhang ist die Existenz einer passenden Ladeinfrastruktur. Wie diese optimale räumliche Verteilung der Ladestationen im Fernverkehrsnetz von Österreich auszusehen hat, ist die Fragestellung dieser Diplomarbeit. Neben der Untersuchung für den derzeitigen Stand der Technik und Anteil an Elektrofahrzeugen werden verschiedene Szenarien analysiert, die unter anderem die Zukunft der Elektromobilität repräsentieren sollen. Hierfür wird mittels Matlab ein geeignetes Optimierungsmodell entworfen, das auf Basis des österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetzes und den zugehörigen Verkehrsflussdaten die optimale Anzahl und Lokation der Ladestationen und Ladesäulen berechnet. Die berechnete Verteilung wird anschließend mithilfe von QGIS grafisch dargestellt, um die räumliche Verteilung bewerten zu können. Als mögliche Standorte werden alle Rastpunkte des Fernverkehrsnetzes verwendet, da dort die nötige Infrastruktur für Parkplätze und Stromversorgung bereits gegeben und dementsprechend der Ausbau mit kleinstmöglichem Aufwand realisierbar ist. Neben dem Finden der optimalen räumlichen Verteilung der Ladestationen und Ladesäulen wird mittels des Optimierungsmodells der maximale Profit des Betreibers der Ladeinfrastruktur berechnet. Die Ergebnisse der einzelnen Szenarien der Diplomarbeit zeigen, dass sich die Technologie der Ladestationen und Batterien der Elektrofahrzeuge sehr stark weiterentwickeln muss, da der Energiebedarf für eine komplett elektrische Antriebsweise der PKWs im Fernverkehr sonst unmöglich gedeckt werden kann. Ein Grund dafür ist beispielsweise, dass mit dem heutigen Stand der Technik die Anzahl der Parkplätze viel zu hoch wäre, die für die hohe Anzahl an Ladestationen und Ladesäulen der Elektrofahrzeuge erforderlich sein würde. Die aktuelle Forschung und Entwicklung, wie sie in der Literatur präsentiert wird, zeigt allerdings genau in die richtige Richtung für mehr Elektromobilität in Österreichs Fernverkehrsnetz. Diese Richtung ist zum einen durch höhere Ladeleistungen und den damit verbundenen kürzeren Ladedauern und zum anderen durch größere Batteriekapazitäten der Elektrofahrzeuge und

den dadurch höheren Reichweiten gegeben. Wie diese Diplomarbeit zeigt, ergibt sich durch die zunehmende Elektrifizierung des Fernverkehrs von der ökologischen Betrachtungsweise ein extrem hohes Einsparungspotential der Treibhausgas-Emissionen. Auf der anderen Seite bedeutet das für den Finanzhaushalt des Staats eine sehr große Herausforderung, da ein sehr großer Teil an Steuern wegfällt, der durch die vorhandene Mineralölsteuer und motorbezogene Versicherungssteuer für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren anfällt.

Abstract

Due to the rapid growth of the number of electric vehicles in Austria in recent years, the topic of electric mobility is becoming increasingly important. In addition to its indisputable advantages, this development bears a number of challenges. Each of it requires appropriate solutions. One of the biggest challenges in this context is the existence of a suitable charging infrastructure. How this optimal spatial distribution of the charging stations in the long-distance transport network of Austria has to look is the issue of this diploma thesis. In addition to the study of the state-of-the-art and the current percentage of electric vehicles, various scenarios are analyzed. These should represent the future of electric mobility. For this purpose, a suitable optimization model has been developed in Matlab, that calculates the optimum number and location of charging stations and charging columns based on the Austrian motorways and expressway network and the associated traffic flow data. Then the calculated distribution is graphically plotted using QGIS to evaluate the spatial distribution. All rest points of the long-distance network are used as possible locations, because the necessary infrastructure for parking and power supply is already given there. In addition to find the optimum spatial distribution of the charging stations, the optimizing model calculates the greatest possible profit for the charging infrastructure operator. The results of the individual scenarios of the diploma thesis show, that the technology of the charging stations and batteries of the electric vehicles has to be improved very strongly, because otherwise the energy requirement for a completely electrified traffic can not be achieved. One reason for this is for example, that with the current state of the art the number of parking spaces would be much too high, which would require the large number of charging stations. However, the current research and development, as presented in the literature, points exactly in the right direction for more electric mobility in Austria's long-distance network. This direction is given on the one hand by higher charging power and the associated shorter charging time and on the other hand by larger battery capacity of electric vehicles and thereby higher ranges. As this diploma thesis shows, the increasing electrification of long-distance transport results in an extremely high saving potential of greenhouse gas emissions from the ecological point of view. On the other hand, this is a very big challenge for the financial budget of Austria, as it eliminates a very large amount of tax due to the current petroleum tax and motor-related insurance tax for combustion engine vehicles.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1

1.1. Motivation 1

1.2. Fragestellung und Methode 1

1.3. Aufbau der Arbeit 3

2. Status Quo in der Literatur 4

2.1. Ladeinfrastruktur in Österreich 4

2.2. Technologien der Ladestationen und deren Zukunft 5

2.3. Methoden zur optimalen Platzierung von Ladestationen 7

2.3.1. Allgemeine Methoden für die Planung von Ladestationen 7

2.3.2. Methoden für die Planung von Ladestationen im urbanen Bereich 8

2.3.3. Methoden für die Planung von Ladestationen im ruralen Bereich 13

2.4. Wissenschaftlicher Beitrag dieser Arbeit 14

3. Modell 15

3.1. Datenquellen 15

3.2. Verkehrsflussberechnung 17

3.3. Energiebedarfsberechnung 19

3.4. Optimierungsmodell 19

3.4.1. Annahmen zum Modell – Definition des Status Quo 23

3.4.2. Skalierung des Modells 25

3.4.2.1. Wirtschaftliche Skalierung 25

3.4.2.2. Technische Skalierung 26

3.5. Szenarien 26

3.5.1. Status Quo 27

3.5.2. Substitution des gesamten fossilen Personenverkehrs durch Elektromobilität 27
3.5.3. Technologische Entwicklung der Ladestationen und Elektrofahrzeuge 28
3.5.4. Ladestrompreisentwicklung 29
3.5.5. Urlauberverkehr 29
3.5.6. Überblick der Szenarien 30
4. Ergebnisse und Diskussion 31
4.1. Status Quo 31
4.2. Substitution des gesamten fossilen Personenverkehrs durch Elektromobilität 32
4.3. Technologische Entwicklung der Ladestationen und Elektrofahrzeuge 35
4.4. Ladestrompreisentwicklung 38
4.5. Urlauberverkehr 40
4.6. Auswirkungen der Elektrifizierung des Verkehrs 41
5. Schlussfolgerungen 45
Literaturverzeichnis 48
Abbildungsverzeichnis 50
Anhang 51
5.1. Annahmen der Szenarien 51
5.2. Datensatz für das Optimierungsmodell 53

1.Einleitung

In den folgenden Absätzen wird eine kurze Einführung in die Motivation, die Fragestellung und Methode und den Aufbau der Arbeit gegeben.

1.1. Motivation

Durch den enormen Zuwachs an Elektrofahrzeugen in den letzten Jahren in Europa und speziell in Österreich gewinnt das Thema E-Mobilität immer mehr an Bedeutung. Die Vorteile gegenüber konventionell betriebenen Kraftfahrzeugen überwiegen immer mehr und die allzeit diskutierten Punkte wie die geringe Reichweite und lange Ladedauer der Elektrofahrzeuge werden vermutlich bald der Vergangenheit angehören. Dieser rasante Zuwachs bringt allerdings auch seine Herausforderungen mit sich, die sich vor allem im Stromversorgungsnetz bemerkbar machen werden. Durch Schnellladestationen ergibt sich eine sehr hohe punktuelle Belastung im Bereich von mehreren hundert Kilowatt oder in Zukunft sogar einigen Megawatt, abhängig von der Anzahl der Ladesäulen.

Der Zusammenhang zwischen Elektrofahrzeugen und dessen öffentliche Ladeinfrastruktur ist ein klassisches „Henne-Ei-Problem“. Ohne ein gut ausgebautes Ladenetz wechselt ein KFZ-Besitzer nicht zu einem Elektrofahrzeug und andererseits wird die Ladeinfrastruktur vom Betreiber ohne entsprechende Nachfrage nicht überdimensioniert ausgebaut. Deshalb müssen diese beide Bestandteile der E-Mobilität, die Anzahl der Elektrofahrzeuge und dessen Ladeinfrastruktur, im selben Tempo wachsen. Im Falle von Österreich hat die Politik die Attraktivität für den Kauf eines Elektrofahrzeugs mit geeigneten Förderungsmaßnahmen bereits steigern können und zugleich wird die öffentliche Ladeinfrastruktur stetig erweitert und ausgebaut. Damit stimmt die Richtung für eine weitere Elektrifizierung in Österreichs Straßenverkehr.

1.2. Fragestellung und Methode

Das grundlegende Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die optimale Platzierung von Ladestationen für den PKW-Verkehr des österreichischen Fernverkehrsnetzes zu finden. Nachdem in

Österreich bereits eine bestimmte Anzahl an Ladestationen für den aktuell herrschenden Bedarf vorhanden ist, ist es vor allem interessant, wie der zukünftige weitere Ausbau aussehen soll. Unter bestimmten Annahmen werden unterschiedliche Szenarien formuliert und deren optimale Lösungen gesucht.

Hierfür wird zunächst in Matlab[1] ein Optimierungsmodell erstellt, das unter Berücksichtigung einiger Nebenbedingungen den maximalen Profit des Ladestationenbetreibers zum Ziel hat. Dieser errechnet sich aus den Einnahmen der geladenen Energiemenge und den Ausgaben für die Ladestationen. Zugleich wird über diese Optimierung die optimale Verteilung von Ladestationen in Österreich berechnet, sodass der gesamte Energiebedarf der Elektrofahrzeuge entlang aller Autobahnen und Schnellstraßen abgedeckt werden kann. Die optimale Anzahl an Ladestationen und Ladesäulen hängt dabei direkt vom Anteil der Elektrofahrzeuge ab. Durch Variation der verschiedenen Parameter, die im Optimierungsmodell vorkommen, können unterschiedliche Szenarien generiert werden und deren Einflüsse auf die Optimierung getrennt voneinander betrachtet und diskutiert werden.

Zum Beispiel wird in einem Szenario die optimale Ladeinfrastruktur für die Entwicklung der E-Mobilität berechnet. Ausgehend vom Status Quo bis hin zu einer kompletten Elektrifizierung der PKWs im Fernverkehrsnetz wird die Entwicklung der Ladeinfrastruktur aufgezeigt. In einem anderen Szenario wird beispielsweise die Entwicklung der Ladetechnologien und der Elektrofahrzeuge behandelt. Im Falle der Entwicklung der Ladetechnologien wird eine höhere Ladeleistung und die damit verbundene kürzere Ladedauer verstanden. Mit der Entwicklung der Elektrofahrzeuge ist in diesem Fall die größer werdende Batteriekapazität und die damit zusammenhängende größere Reichweite gemeint. Diese Einflüsse auf die optimale Platzierung der Ladestationen werden mit diesem Szenario im Detail untersucht.

Neben der analytischen Auswertung des Optimierungsmodells wird in den meisten Szenarios auch eine grafische Auswertung präsentiert. Die räumliche Verteilung der Ladeinfrastruktur, die mittels Matlab berechnet wird, wird mit QGIS[2] grafisch dargestellt. Damit sieht man auf einen Blick die gesamte Platzierung und Verteilung der Ladestationen und Ladesäulen für das jeweilige Szenario.

[1] vgl. https://de.mathworks.com/products/matlab.html (abgerufen am 23.10.2017)
[2] vgl. https://www.qgis.org/de/site/ (abgerufen am 08.05.2017)

1.3. Aufbau der Arbeit

Das Kapitel 2 gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Literatur hinsichtlich Ladeinfrastruktur in Österreich, den Technologien der Ladestationen und deren zukünftigen Entwicklungen, den optimalen Platzierungen von Ladestationen im urbanen und ruralen Raum und den damit verbundenen Optimierungsmodellen und Methoden. Darüber hinaus wird kurz auf das Alleinstellungsmerkmal und den wissenschaftlichen Beitrag dieser Diplomarbeit eingegangen.

Im Kapitel 3 wird zunächst auf die benötigten Datenquellen und die Aufbereitung der verwendeten Daten eingegangen. Anschließend wird das in Matlab implementierte Optimierungsmodell sowie dessen Annahmen für den Status Quo im Detail beschrieben. Des Weiteren wird auf die wirtschaftlichen und technischen Aspekte eingegangen, die für die Modellskalierung von Bedeutung sind. Abschließend werden die folgenden verschiedenen Szenarien beschrieben:

- Status Quo
- Entwicklung der E-Mobilität in Österreich
- Entwicklung der Ladetechnologien und der Elektrofahrzeuge
- Ladestrompreisentwicklung
- Urlauberverkehr

Im Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Optimierungen der unterschiedlichen Szenarien präsentiert und anschließend diskutiert. Dabei wird vor allem auf die Relevanz der einzelnen Szenarien eingegangen und welchen speziellen Beitrag diese zur Diplomarbeit leisten.

Abschließend wird im Kapitel 5 ein Ausblick auf die mögliche zukünftige Entwicklung der E-Mobilität gegeben und Schlussfolgerungen anhand der präsentierten Ergebnisse getroffen.

2.Status Quo in der Literatur

Im folgenden Kapitel wird ein grober Auszug des aktuellen Standes in der Literatur in Bezug auf die Thematik der Diplomarbeit beschrieben. Damit wird ein guter Überblick über die mit der E-Mobilität zusammenhängenden Gebiete gegeben.

2.1. Ladeinfrastruktur in Österreich

Nachdem im Rahmen dieser Diplomarbeit die optimale räumliche Verteilung von Ladestationen für Elektromobilität im Fernverkehrsnetz von Österreich im Detail untersucht wird, ist vor allem der aktuelle Stand der Ladeinfrastruktur von Bedeutung. Laut eigenen Angaben des Unternehmens SMATRICS wird das eigene Ladenetz auf der Webseite wie folgt beschrieben:

> *„Das SMATRICS Netz ist Österreichs einziges flächendeckendes Hochleistungs-Ladenetz. Mehr als 435 Ladepunkte stehen heute bereits zur Verfügung. Davon sind rund 210 Highspeed Ladepunkte mit Leistungen von 43 bzw. 50 kW – ca. alle 60 km entlang der Autobahnen und in Ballungszentren. Für Vollladungen in 20 Minuten. Und immer mit Strom aus 100 % Wasserkraft.“*[3]

Damit hat das Unternehmen bereits eine Ladeinfrastruktur für Elektromobilität mit einem Alleinstellungs-Merkmal ausgebaut. Wenn man sich das beschriebene Ladenetz auf der Karte ansieht, dann ist sehr schnell zu erkennen, dass bereits ein paar wenige Ladestationen im Ausland errichtet wurden, wo offensichtlich ebenso ein Ladebedarf herrscht. Auffallend ist außerdem, dass die höchste Dichte an Ladestationen nach Wien in Kitzbühel und Umgebung herrscht, was vermutlich mit dem starken Tourismus korrespondiert. Auf der Webseite werden dem Kunden zurzeit drei verschiedene Tarifoptionen angeboten, die sich aufgrund der verschiedenen Zielgruppen in der Grundgebühr, der Bindungszeit und der Lade-Entgelte wesentlich unterscheiden. Damit werden sowohl diejenigen Besitzer von Elektrofahrzeugen angesprochen, die sehr selten bis nie eine SMATRICS-Ladestation aufsuchen, als auch diejenigen, die sehr oft im Fernverkehr der Autobahnen unterwegs sind und somit sehr oft auf

[3] vgl. https://smatrics.com/ladenetz (abgerufen am 25.01.2018)

solch eine Ladestation angewiesen sind. Durch die derzeit vorhandene Ladeinfrastruktur ist zwar eine solide Grundlage gegeben, die allerdings wesentlich erweitert werden muss, wie sich im Laufe der Arbeit zeigen wird.

Neben dem oben genannten Unternehmen bietet auch TESLA[4] eine Ladeinfrastruktur für das Fernverkehrsnetz in Österreich an, allerdings nur für Teslafahrzeugbesitzer. Mit insgesamt 16 Supercharger Ladestationen, jene mit der derzeit höchsten Ladeleistung von bis zu 120kW, deckt der Autokonzern ebenso das komplette Fernverkehrsnetz in Österreich ab, allerdings mit einer wesentlich größeren Distanz zwischen den einzelnen Punkten als das Smatrics Ladenetz, das für alle Besitzer von Elektrofahrzeugen zugänglich ist. Durch die größere Batteriekapazität dieser Fahrzeuge im Vergleich zu anderen Automobilherstellern stellt dies für die Kunden allerdings keine Hürde dar.

2.2. Technologien der Ladestationen und deren Zukunft

Um eine Verkürzung der Ladezeiten zu erreichen, muss die fortschreitende Technologie der Ladestationen hin zu höheren Ladeleistungen gehen. Ein Beispiel für ultra-schnelle Ladestationen für elektrisch betriebene Busse im öffentlichen Verkehr beschreibt Blahnik et al. (2017). Nicht nur für den Privatverkehr ist eine kürzere Ladezeit wünschenswert, ebenso für öffentliche Verkehrsmittel ist dies von großer Bedeutung, da Busse an den Endstationen nur wenige Minuten Standzeit haben. Mit einer typischen Batteriekapazität von etwa 20-25 kWh ergibt eine Ladeleistung von etwa 300 kW eine 80%ige Ladung in unter 4 Minuten. Diese Arbeit beschreibt eine kosteneffektive Topologie von solchen Ladestationen und deren Ladestrategie, die eine Ladeleistung von über 300 kW bereitstellen kann. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Ladealgorithmus und dessen Auswirkung auf das Stromversorgungsnetz, welcher durch eine durchgeführte Simulation im stationären und transienten Betriebszustand untersucht wurde.[5]

Die Leistungselektronik, die der Kernpunkt einer ultra-schnellen Ladestation ist, wird in Aggeler et al. (2010) beschrieben. Im Detail wird dabei auf zwei verschiedene Architekturen eingegangen, die aufgrund der vorherrschenden Sicherheitsstandards die galvanische

[4] vgl. https://www.tesla.com/de_AT/supercharger (abgerufen am 25.01.2018)
[5] vgl. Blahnik et. al (2017), S. 6658-6662

Isolation gegenüber dem Stromversorgungsnetz sicherstellen müssen. In einem Fall wird eine niederfrequente galvanische Isolierung durch einen LF-Transformator vor der Ladestation implementiert. Im anderen Fall wird ein HF-Transformator direkt in der DC-DC-Konverterstufe eingebaut um eine hochfrequente galvanische Isolierung zu erreichen. Die detaillierten Unterschiede sowie Vor- und Nachteile der jeweiligen Architektur werden beschrieben und anschließend analysiert. Einer der großen Vorteile der HF-Isolation ist zum Beispiel die Reduzierung an magnetischem Material, Volumen und Gewicht. Abschließend wird die Auswirkung von ultra-schnellen Ladestationen, die also eine Ladeleistung im Bereich von 125 kW bis 300 kW aufweisen, auf das Stromversorgungsnetz untersucht. Dafür werden beispielsweise 8 x 300 kW Ladestationen in einem ländlichen Gebiet von Schweden eingebunden. Basierend auf der tatsächlich existierenden Netzinfrastruktur werden unterschiedliche Szenarien simuliert und das Worst-Case-Szenario beschrieben. Im ungünstigsten Fall ergeben sich in der Umgebung der Ladestationen Spannungsabweichungen von 3 % bis 8 %, welche durch energiespeichernde Elemente wie Batterien oder Schwungräder vermieden werden könnten.[6]

Einen weiteren Einblick in die Leistungselektronik für die zukünftigen ultraschnellen Ladestationen mit einer zugleich unterstützenden Funktion für das Stromversorgungsnetz wird in Wang et al. (2012) gegeben. Die darin beschriebene multifunktionelle Ladestation erlaubt bidirektionale Leistungsflüsse, die für die gleichzeitige Einbindung von Energiespeichern und erneuerbare Energiequellen notwendig sind. Damit ist es möglich, dass diese Ladestationen nicht nur zum Laden von Elektrofahrzeuge verwendet wird, sondern auch gleichzeitig zur Netzstabilität beitragen. Aus diesem Grund fungieren diese Ladestationen wie ein Drehkreuz der Energie. Die Energie für das Aufladen eines Fahrzeugs kann dadurch sowohl vom Energiespeicher und den erneuerbaren Quellen als auch vom Stromnetz kommen. Aufgrund der sehr hohen Leistungen sollten die Ladestationen mit einer Mittelspannung von mehreren Kilovolt gespeist werden, da in diesem Fall die Leitungsverluste auf ein Minimum reduziert werden können. Abschließend wird dieser Ansatz für eine multifunktionelle Ladestation simuliert und dessen positive Auswirkung auf das Versorgungsnetz anhand eines Beispiels aufgezeigt.[7]

[6] vgl. Aggeler et al. (2010), S. 1-8
[7] vgl. Wang et al. (2012), S. 1-8

2.3. Methoden zur optimalen Platzierung von Ladestationen

Nachdem die Methoden zur Planung von Ladestationen für den urbanen und ruralen Raum sehr stark differieren, wird dieses Kapitel in mehrere Unterkapitel unterteilt. Wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit Methodenbeschreibungen für beide Bereiche beschäftigen, werden in einem dritten Unterkapitel beschrieben. Zunächst jedoch wird ein Beitrag beschrieben, der eine Grundlage für viele weitere Arbeiten liefert.

In Meyner (2012) wird eine Einführung in Netzwerk-Fluss-Probleme gegeben. Darin wird die Grundlage der Graphentheorie beschrieben, die für das Verständnis von Problemen dieser Art unerlässlich ist. Ganz allgemein gesagt lassen sich Graphen für verschiedenste Problembeschreibungen einsetzen um damit eine geeignete Lösung zu finden. Die Maximierung des Flusses, ganz gleich welcher Fluss in der Praxis gemeint ist, ist oft die Fragestellung eines Problems. Schritt für Schritt wird aufbauend auf den Grundlagen auf das min-cut max-flow Theorem näher eingegangen und eine Beschreibung des Ford-Fulkerson Algorithmus gegeben, welcher durch ein Beispiel im Detail erklärt wird.[8]

2.3.1. Allgemeine Methoden für die Planung von Ladestationen

Capar (2012) berücksichtigt die Reichweite von alternativ betriebenen Fahrzeugen, wie z.B. durch Wasserstoff, Batterien oder Biodiesel, um damit den maximalen Fluss an Fahrzeugen entlang gewissen Pfaden zu generieren. Im Detail geschieht dies durch ein sogenanntes Flow-Refueling Location Model (FRLM), welches mit einer fest vorgegebenen Anzahl an Ladestationen arbeitet. Dafür wird ein zweistufiger Ansatz verwendet. In einem ersten Schritt werden Kombinationen von Orten generiert, die geeignet sind um jede Route bestmöglich abzudecken. In einem zweiten Schritt wird nun mittels einer ganzzahligen Optimierung eine bestimmte Anzahl von Ladestationen so platziert, dass der Fluss an Fahrzeugen maximiert wird, unter der Voraussetzung, dass es eine Kombination aus Schritt eins ist. Das in der Arbeit implementierte FRLM zeigt sich z.B. aufgrund der Tatsache, dass damit auch große Netzwerke in einer vertretbaren Zeit berechnet und gelöst werden können, als eine sehr gute Wahl für die Optimierung dieses Problems.[9]

[8] vgl. Meyner (2012), S. 33-38
[9] vgl. Capar (2012), S. 622-636

In Lu (2015) wird das von Capar (2012) beschriebene FRLM erweitert, da für den optimalen Ausbau einer Ladeinfrastruktur nicht nur die Reichweite eines Fahrzeugs eine Bedingung darstellt, sondern auch die Wartezeiten bei den jeweiligen Ladestationen. Deshalb ist vor allem auch die Anzahl der Ladesäulen je Ladestation von größter Bedeutung. Ausgehend vom FRLM in Kombination mit der Warteschlangentheorie wird ein Modell erstellt, das auch die maximale Wartezeit eines Kunden berücksichtigt. Damit können die Ladestationen so platziert werden, dass ein Maximum an Ladeservice für die Kunden herrscht. Das implementierte Optimierungsmodell wird abschließend unter verschiedenen Parametern wie dem vorhandenen Budget, der Reichweite der Fahrzeuge, der durchschnittlichen Ladezeit eines Fahrzeugs und der maximalen Wartezeit anhand eines Testnetzwerks untersucht und bewertet. Dabei stellt sich heraus, dass der Prozentsatz der wiederaufgeladenen Elektrofahrzeuge zu einer bestimmten Zahl tendiert, die bei ca. 70 % liegt. Desto höher der Budgetrahmen gewählt wird, umso mehr Ladestationen können gebaut werden und die Wartezeit wird zunehmend unbedeutender. Lediglich die Reichweite der Fahrzeuge legt in diesem Fall die Obergrenze der Abdeckung fest. Wenn die Ladezeiten steigen, was durch größere Batteriekapazitäten und der damit verbunden größeren Reichweite der Fall sein kann, muss ein größeres Budget vorhanden sein um dieselbe Abdeckung erreichen zu können. Wenn hingegen die Ladezeiten kurz genug sind, was in Zukunft durch noch höhere Ladeleistungen erreicht werden soll, dann wird die Wartezeit ebenso unbedeutend und es kommt zum selben Ergebnis wie beim reinen FRLM.[10]

2.3.2. Methoden für die Planung von Ladestationen im urbanen Bereich

In Lam et al. (2014) wird das Problem der Platzierung von Ladestationen in Städten im Detail untersucht. Da es sich bei diesem Problem um ein Netzwerkflussproblem handelt, wird mittels der Graphentheorie ein Netzwerk aus Kanten und Knoten aufgestellt, das dem Verkehrsnetz einer Stadt entspricht. Die Fragestellung richtet sich nach einer optimalen Lokation der Ladestationen im Verkehrsnetz um mit möglichst wenigen Ladepunkten den Verkehrsfluss der Elektrofahrzeuge optimal abzudecken. Aus diesem Grund arbeiten die Lösungsansätze

[10] vgl. Lu (2015), S. 1-5

allesamt kostenminimierend. Es werden vier verschiedene Lösungsansätze formuliert, die dieses Problem mittels eines bestimmten Algorithmus lösen. Jede der vier Methoden hat seine eigenen Charakteristiken und Vorteile und deshalb eignen sie sich unterschiedlich gut hinsichtlich der Merkmale: Lösungsqualität, Effizienz des Algorithmus, Größe des Netzwerks, Aufbau des Algorithmus und verschiedenen Voraussetzungen an das System. Diese vier Optimierungsmodelle werden zum einen an simulierten Verkehrsnetzen und zum anderen an einer echten Stadt wie Hongkong getestet und hinsichtlich obiger Merkmale untersucht. Ebenso wird die Rechenzeit der einzelnen Optimierungen analysiert und bewertet. Dadurch wird ein Überblick über die verschiedenen Lösungsansätze, sowie deren Vor- und Nachteile und vor allem deren Anwendungsgebiete gegeben. Das Hauptaugenmerk in dieser Arbeit liegt dabei mehr auf dem menschlichen und sozialen Aspekt, als auf dem technisch möglichen Aspekt. Das bedeutet, jedes Elektroauto soll aus verbraucherfreundlichen Gründen möglichst in der Nähe eine Ladestation aufsuchen können, anstatt mit der restlichen Reichweite des Fahrzeugs durch die ganze Stadt zur nächsten Ladestation zu fahren, auch wenn es technisch möglich wäre.[11]

Eine weitere Methode zur Planung von Ladestationen für Elektrofahrzeuge im städtischen Bereich wird in Guang (2016) beschrieben. Basierend auf einem städtischen Verkehrsfluss werden die spezifischen Charakteristiken des Verkehrs und des Fahrverhaltens analysiert. Mittels eines Markov Models wird anschließend eine Prognose des Verkehrsflusses erstellt um damit auf den Ladebedarf zu schließen. Das Ziel des Optimierungsproblems liegt in der Maximierung des Profits, unter Berücksichtigung des Verkehrsflusses, der Verkehrsdichte und den Anforderungen an das elektrische Verteilnetz. Gelöst und simuliert wird das Problem mithilfe eines robusten Optimierungsalgorithmus. Damit wird dessen Praktikabilität für die Planung von Ladeinfrastrukturen aufgezeigt und bestätigt.[12]

In Catalbas et al. (2017) wird die optimale Platzierung von Ladestationen für die Stadt Ankara in der Türkei beschrieben. Mit Hilfe einer quellenfreien Landkarten-Software wird das Verkehrsnetz der Stadt eingebunden und durch mehrere unterschiedliche Clustering-Methoden in sogenannte Cluster unterteilt. Durch die Berücksichtigung der absoluten Anzahl der derzeitigen Elektrofahrzeuge und der durchschnittlichen tagtäglich zurückgelegten

[11] vgl. Lam et al. (2014), S. 2846-2856
[12] vgl. Guang (2016), S. 1-5

Strecke wird die Datengrundlage für das Modell bereitgestellt. Dadurch ergibt sich ein gewisser Energiebedarf in den Clustern, der durch eine bestimmte Anzahl von Ladestationen abgedeckt werden muss. Um dieses Optimierungsproblem zu lösen wurde ein Gaussian Mixture Model (GMM) verwendet.[13]

Die optimale Platzierung von Ladestationen für städtische Taxiunternehmen wird in Asamer et al. (2016) beschrieben. Vor allem Taxis besitzen ein großes Potential für Elektrofahrzeuge, da sie zumeist kurze Strecken fahren, eine hohe Kilometerleistung haben und ohnehin immer wieder unvermeidbare Standzeiten haben um auf Passagiere zu warten, welche genutzt werden können um die Batterie zu laden. Als Grundlage für die Entwicklung des Modells, welches die optimale Lokation der Ladestationen berechnet, wurden reale Fahrdaten von etwa 800 Taxis der Stadt Wien verwendet. In einem ersten Schritt wurde die Stadt in eine bestimmte Anzahl von Zellen unterteilt (rund 1500), die somit weit kleiner sind als die städtischen Bezirke. Anhand der oben genannten Fahrdaten der Taxis wurde nun berechnet, wieviel Ladebedarf in den einzelnen Zellen herrscht, wenn alle Fahrzeuge, die aktuell mit fossilen Kraftstoffen fahren, Elektrofahrzeuge wären. In einem weiteren Schritt wurde ein Optimierungsmodell entworfen, das sich der ganzzahligen linearen Optimierung bedient, ähnlich wie eine der vier Methoden in Lam et al. (2014). Bei der Entwicklung dieses Modells ging es vor allem darum, ein mögliches Gebiet für eine Ladestation zu berechnen, aber nicht den exakten Ort, wo eine Ladestation platziert werden sollte. An welchen Punkten diese Ladestationen dann genau platziert werden sollen, hängt von mehreren wirtschaftlichen Faktoren ab, wie zum Beispiel der Kapazität des elektrischen Versorgungsnetzes, Verfügbarkeit von Platz und behördlichen Aspekten. Die Zielfunktion dieses Modell besteht darin, die Anzahl der Taxifahrten zu maximieren, die mit einem Elektrofahrzeug bewältigt werden können. Der Vorteil dieser Optimierung liegt vor allem darin, dass bestehende Schnellladestationen in das Modell als Grundlage eingebunden werden können und eine iterative Erweiterung der Ladestationen stattfinden kann.[14]

In Gopalakrishnan et al. (2016) wird mittels statistischen Methoden eine Prognose für den in Zukunft vorherrschenden Ladebedarf erstellt und daraus anschließend die optimale Lokation für Ladestationen berechnet. Mit Hilfe der kanonischen Korrelationsanalyse und

[13] vgl. Catalbas et al. (2017), S. 1-4
[14] vgl. Asamer et al. (2016), S. 233-246

verschiedenen Datensätzen wie z.B. der Verkehrsdichte, Sehenswürdigkeiten und empirisch vorhandenen Daten von Ladestationen wurde zunächst der Ladebedarf an bestimmten möglichen Plätzen für Ladestationen ermittelt. Mittels eines Optimierungsmodells, welches als Ziel die Maximierung der Abdeckung des Ladebedarfs durch Ladestationen unter Berücksichtigung eines maximalen Budgets hat, werden auf bestmögliche Art die Ansprüche der Besitzer von Elektrofahrzeugen und gleichzeitig der Ladestationenbetreiber erfüllt. Die Effizienz dieser Ladebedarfsprognose und des Optimierungsmodells wurden anschließend anhand von empirischen Daten evaluiert. Dabei zeigte sich, vor allem wenn das vorhandene Budget sehr knapp ist, dass das implementierte heuristische Modell Verbesserungen von 10-20 % im Vergleich zu heuristischen Modellen bietet, die keine Ladebedarfsprognosen verwenden.[15]

Eine räumliche Analyse der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge innerhalb einer Stadt und einer ländlichen Region wird in Gkatzoflias et al. (2016) beschrieben. Dafür wurde eine Methode mittels eines quelloffenen GIS-Programmes entwickelt, um die optimale Lokation der Ladeinfrastruktur innerhalb eines bestimmten räumlichen Gebiets angeben zu können. Zum einen wurde eine Methode für die Stadt Bozen und zum anderen für die Region Südtirol entwickelt, da sich der städtische vom ländlichen Bereich sehr stark differenziert. Im Falle der Stadt wurde diese in räumliche Zellen unterteilt, gleich wie in Asamer et al. (2016). Nun wurde mit Hilfe von fünf verschiedenen Einflussfaktoren die Wichtigkeit jeder Zelle beurteilt. Zu diesen Faktoren zählt die Bevölkerungsdichte, Parkplätze, Stationen von öffentlichen Verkehrsmitteln, öffentliche Gebäude und Einkaufszentren. Die Gewichtungen für diese Faktoren können von Stadt zu Stadt variiert werden, für Bozen wurde jedoch eine gleiche Wertigkeit zu je 20 Prozent gewählt. Dadurch ergibt sich für jede Zelle der Stadt eine Wertigkeit für den vorherrschenden Bedarf an Ladestationen, welche über eine Umrechnung in die Bereiche rot, gelb und blau gefärbt wurden, um dessen Dringlichkeit darzustellen. Für den Fall des ländlichen Verkehrsnetzes wurde zunächst in Bundesstraßen und Autobahnen unterschieden, da diese wesentliche Unterschiede aufweisen. Im Vergleich zum städtischen Modell wird die Ladeinfrastruktur nur an bestimmten Punkten erweitert, hier angenommen an Parkplätzen, Rastplätzen, Tankstellen, etc., damit die zusätzlichen Investitionskosten möglichst geringgehalten werden. Die Methode für das regionale Verkehrsnetz setzt sich zum

[15] vgl. Gopalakrishnan et al. (2016), S. 3117-3123

Ziel, dass innerhalb einer gewissen Distanz von x Kilometern jeder Straße oder Autobahn im Verkehrsnetz eine Ladestation erbaut werden muss, damit jedes Elektrofahrzeug seine Batterie immer wieder aufladen kann. Entlang der ausgewählten Autobahn in Südtirol muss außerdem berücksichtigt werden, dass die Rastplätze nur von einer Seite befahrbar sind. Damit ergibt sich eine eindeutige Lösung dieses Modells, an welchen vorgeschlagenen Orten Ladestationen erbaut werden sollen.[16]

Eine Methodik zum sukzessiven Ausbau der Ladeinfrastruktur für Elektromobilität wird in Hagg et al. (2015) anhand von praktischen Beispielen der Stadt Bonn und dem Rhein-Sieg-Kreis erläutert. Dafür werden in einem ersten Schritt die Grundlagen zweier Optimierungsalgorithmen beschrieben, das Maximum Coverage Location Problem (MCLP) und das Flow Capturing Location Model (FCLM). Durch das MCLP wird gewährleistet, dass eine bestimmte Anzahl von Ladestationen so errichtet werden, dass ein Maximum an Bedarfspunkten abgedeckt wird. Hierzu zählen jene Bedarfspunkte um eine Ladestation als abgedeckt, die innerhalb eines gewissen Radius liegen. Dieses Modell hat den Nachteil, dass es statisch ist. Das FCLM hingegen arbeitet nach einem dynamischen Lösungsansatz, welches die Platzierung von Ladestationen an hochfrequentierten Straßen als Ziel hat. Damit ist es für Fahrzeuge kosten- und zeitoptimal möglich, eine Ladestation aufzusuchen. Aufgrund des Fehlens von Verkehrsflussdaten in der Studie, musste die MCLP-Optimierung angewendet werden, wodurch allerdings zusätzlich ein sukzessiver Ausbau der Ladeinfrastruktur ermöglicht wurde. Aufgrund von mehreren Datensätzen wie Points of Interest (POIs), Verkehrsaufkommen zwischen den Verkehrszellen, Haltestellen von öffentlichen Verkehrsmitteln, etc. wurde mittels unterschiedlich festgelegten Gewichtungsfaktoren der Bedarf der Ladeinfrastruktur für Elektromobilität ermittelt und grafisch dargestellt. Dabei hat sich bei einem Vergleich der Modelle mit und ohne Einbindung des Verkehrsaufkommens zwischen den Verkehrszellen herausgestellt, dass durch die Einbindung eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse vorliegt, da das Verkehrsaufkommen eine große Rolle für die Platzierung der Ladestationen spielt. Weiteres Potential für eine Verbesserung würden Daten des realen Verkehrsflusses bieten, aber auch ohne diese bietet dieses Optimierungsmodell bereits eine gute Grundlage für den sukzessiven Ausbau der Ladeinfrastruktur.[17]

[16] vgl. Gkatzoflias et al. (2016), S. 1-33
[17] vgl. Hagg et al. (2015), S. 1-54

2.3.3. Methoden für die Planung von Ladestationen im ruralen Bereich

In Tan (2014) wird ebenso die optimale Lokation von Ladestationen beschrieben, allerdings in einem Fernverkehrsnetz und mittels eines Flow Capturing Location Models, welches zunächst als deterministisches Modell beschrieben und dann zu einem statistischen Modell erweitert wurde. Das erste Modell verwendet einen konstanten Ladebedarf über der Zeit, der aus dem Verkehrsfluss resultiert und das zweite Modell einen statistischen Ansatz für den Ladebedarf, da sich dieser über die Tageszeit normalerweise ändert. Die Auswertungen der beiden Modelle an denselben hypothetischen Netzwerken zeigen eine große Diskrepanz in der Abdeckung durch die Ladestationen. Das deterministische Modell zeigt zwar eine insgesamt höhere Abdeckung des Ladebedarfs, jedoch ist es in der Realität eher unpassend, da der Ladebedarf in der Realität stochastisch verteilt ist. Deswegen wurde ein sogenanntes Backup-Flow Capturing Model für eine doppelte oder allgemein mehrfache Abdeckung des Ladebedarfs erstellt, welches abhängig vom Mittelwert und der Varianz des Flusses eines jeden Pfades und des Profits der zusätzlichen Abdeckung skaliert wurde.[18]

Ebenso wird in Lin (2015) der Ansatz des Flow Capturing Location Model verwendet, um die Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge zu modellieren. Die Zielfunktion drückt die Maximierung der Abdeckung des Verkehrsflusses von Elektrofahrzeugen durch Ladestationen aus. Unter gewissen Nebenbedingungen wie z.B. einer maximalen Anzahl an Ladepunkten und eines maximalen Budgets wird eine Lösungsmethode präsentiert, die sich der Partikel-Schwarm-Optimierung bedient. Diese hat zum Vorteil, dass sie einfach ist und mit nur wenigen Parametern angepasst werden kann. Deshalb wird sie weit verbreitet unter anderem bei Optimierungsproblemen, neuralen Netzwerken und Fuzzylogiken verwendet. Mittels eines Beispiels eines Fernverkehrsnetzes wird das Modell auf seine Effektivität und seine Praktikabilität überprüft. Darauf aufbauend wird der Zusammenhang zwischen der Anzahl an Ladestationen und den damit abgedeckten Ladebedarf untersucht. Mit der steigenden Anzahl von Ladestationen und den damit verbunden steigenden Errichtungskosten findet das Modell

[18] vgl. Tan (2014), S. 2811-2816

eine optimale Anzahl von Ladestationen, um eine Balance von abgedecktem Ladebedarf und Errichtungskosten zu halten.[19]

2.4. Wissenschaftlicher Beitrag dieser Arbeit

Anhand der beschriebenen Artikeln, die alle im Zusammenhang mit dem Laden eines Elektrofahrzeugs stehen, wird ersichtlich, dass es eine eindeutige Richtung für die weitere Entwicklung der Elektromobilität gibt. Die Ladestationen, die im öffentlichen Bereich im Fernverkehrsnetz erbaut werden, werden in Zukunft immer größer werdende Ladeleistungen besitzen, da das „Tanken“ des Fahrzeugs in der Größenordnung des konventionell betriebenen Kraftfahrzeugs zu liegen kommen soll. Das geht mit mehreren Problemen einher, wie z.B. der sehr hohen punktuellen Belastung des Stromversorgungsnetzes. Dafür wurde bereits in der Literatur eine Möglichkeit gefunden um diese Probleme zu lösen.

In mehreren Arbeiten wurde bereits die optimale Platzierung von Ladestationen im Detail beschrieben und anhand von unterschiedlichen Methoden und Optimierungsmodellen implementiert. Dabei hängt die verwendete Methode sehr stark von den Rahmenbedingungen ab, ob es sich z.B. um einen urbanen oder ruralen Raum handelt. Jede der präsentierten Methoden ist unterschiedlich in ihren Anforderungen und Vor- und Nachteilen. Speziell hängt die Praktikabilität auch von der vorhandenen Grundlage an Daten ab.

Allerdings konnte für die Ladeinfrastruktur des Fernverkehrsnetzes von Österreich bis jetzt kein wissenschaftlicher Artikel in der Literatur gefunden werden. Das ist der Grund, warum diese Arbeit einen einzigartigen wissenschaftlichen Beitrag liefert. Ausgehend vom Ansatz des FCLM wird dieser erweitert und speziell an die Gegebenheiten des Verkehrsnetzes in Österreich angepasst. Im Detail wird ein Optimierungsproblem für eine bestimmte Zielfunktion unter gewissen Nebenbedingungen formuliert und für unterschiedliche Szenarien gelöst. Damit kann ein wichtiger Beitrag für die aktuell vorhandene Ladeinfrastruktur in Österreichs Fernverkehrsnetz, aber auch dessen Entwicklung, mit dieser Diplomarbeit beschrieben werden.

[19] vgl. Lin (2015), S. 1-6

3.Modell

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird eine Methodik entwickelt, um die Ladeinfrastruktur für das Fernverkehrsnetz in Österreich optimal auszubauen. Um das Modell im Detail beschreiben zu können, muss zunächst die Datengrundlage erarbeitet werden, da die benötigten Daten nicht immer in direkter Form verfügbar sind. Darunter zählen z.B. die Verkehrsflüsse entlang des Autobahn- und Schnellstraßennetzes in Österreich und der daraus resultierende Energiebedarf für Elektrofahrzeuge. Aufbauend darauf wird ein Modell formuliert, um über eine Optimierung die bestmögliche Lokation der Ladestationen berechnen zu können. Das implementierte Modell wird in Matlab formuliert und gelöst und anschließend mittels der kartografischen Software QGIS grafisch ausgewertet.

3.1. Datenquellen

Grundsätzlich werden für das Modell zum einen die Daten des Verkehrsflusses und zum anderen die Daten der Raststationen auf den Autobahnen und Schnellstraßen benötigt. Diese benötigten Daten lassen sich in ihrer Ursprungsform von der Webseite der ASFINAG herunterladen.[20]

Die Daten des Verkehrsflusses sind für das gesamte Autobahn- und Schnellstraßennetz in Österreich für jeden Monat in einer CSV-Datei zusammengefasst. Die einzige Ausnahme ist die S37. Da es für diese Schnellstraße leider keine Verkehrsdaten gibt, wurde diese im kompletten Modell außer Acht gelassen. Nach einem kurzen Vergleich der Verkehrsflüsse der unterschiedlichen Monate hat sich herausgestellt, dass diese nur geringfügig abweichen und somit ein beliebiger Monat herangezogen wurde, in diesem Fall September 2017. Diese Tatsache dürfte vor allem mit dem großen Anteil an Berufsverkehr zu erklären sein. In dieser Datei befinden sich die Verkehrsflüsse an gewissen Zählstellen der Autobahn pro Wochentag und KFZ-Klassifizierung, welche zunächst passend gefiltert werden mussten. Nachdem es in dieser Arbeit lediglich um den Verkehr von Personenkraftwagen geht, wurden ausschließlich die Verkehrsflüsse der Kraftfahrzeuge mit einem höchstzulässigen Gesamtgewicht von 3500 kg für die weitere Vorgehensweise verwendet. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die

[20] vgl. https://www.asfinag.at/verkehr/verkehrszaehlung/ (abgerufen am 01.11.2017)

Verkehrsflüsse unter der Woche vom Wochenende nur wenig abweichen. Deshalb wurde aus allen sieben Wochentagen ein Durchschnitt berechnet, der für das gesamte Modell verwendet wird. Damit ergibt sich zunächst ein Verkehrsfluss pro Autobahn und Schnellstraße an den jeweiligen Zählstellen pro Richtung. Im Falle der Autobahn A1 gibt es z.B. in Richtung Walserberg 35 solcher Zählstellen.

Die Daten der Rastanlagen für das gesamte Autobahn- und Schnellstraßennetz in Österreich wurden von der ASFINAG Webseite manuell in eine CSV-Datei geschrieben.[21] Dabei sind für jeden Rastpunkt neben dem Namen die Autobahn, die Richtung, der Standort (in Autobahnkilometer) und die Art des Rastpunkts von Bedeutung. Die Art wird mit einer Kennzahl beschrieben, wobei eine „0“ eine Raststation, eine „1“ einen Rastplatz und eine „2“ einen einfachen Parkplatz kennzeichnet. Die Richtung, in die der Rastpunkt befahrbar ist wird ebenso mit einer Kennzahl definiert, wobei eine „0“ die Normalrichtung bedeutet, eine „1“ beschreibt die Inversrichtung und eine „2“ heißt, dass dieser von beiden Richtungen befahren werden kann. Mit Normalrichtung wird zB. die Richtung von Wien nach Walserberg gemeint, ebenso wie die Autobahnkilometer definiert werden.

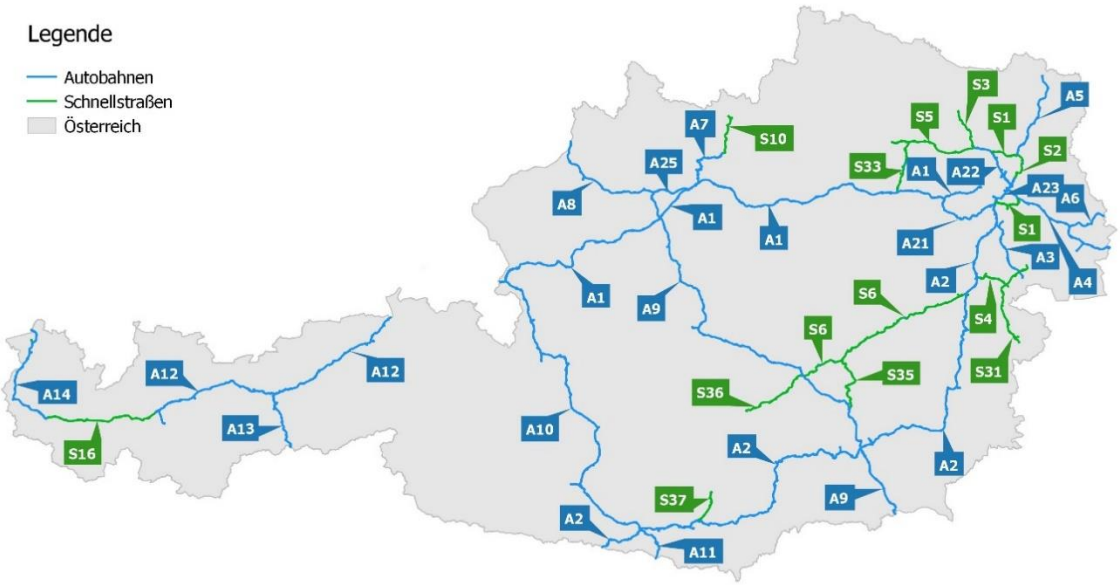

Abbildung 1: Autobahn- und Schnellstraßennetz in Österreich

Um eine grafische Auswertung machen zu können, waren noch die geografischen Daten von Österreichs Staatsgrenze und dem Autobahnen- und Schnellstraßennetz in Form eines ESRI-

[21] vgl. https://www.asfinag.at/verkehrssicherheit/rasten/rastanlagensuche/ (abgerufen am 17.01.2018)

Shapefiles von Nöten. In Abbildung 1 werden diese Daten grafisch verwendet und somit ein Überblick über alle Autobahnen und Schnellstraßen in Österreich (Stand 2017) gegeben. Darin sind auch jene Autobahnen und Schnellstraßen eingezeichnet, für die keine Daten des Verkehrsflusses vorhanden sind (S37) bzw. die keine Rastpunkte enthalten (A23, S2, S3, S10).

3.2. Verkehrsflussberechnung

Für die spätere Modellierung werden die Verkehrsflussdaten an den jeweiligen Rastpunkten benötigt. Nachdem es allerdings nur eine gewisse Anzahl an Zählstellen für den Verkehrsfluss entlang einer Autobahn oder Schnellstraße gibt und die Standorte der Rastanlagen nicht mit diesen übereinstimmt, wird zunächst eine Methode präsentiert, um den Verkehrsfluss an jedem beliebigen Punkt der Autobahn berechnen zu können. Vom Prinzip her handelt es sich dabei um eine Annäherung durch eine Funktion an die vorhandenen Wertepaare des Verkehrsflusses in Abhängigkeit vom Standort. In Matlab kann dies sehr einfach durch die Funktion *newgrnn*[22], die ein allgemeines neuronales Regressionsnetzwerk aus einem vorhandenen Datensatz bildet, bewerkstelligt werden. Dazu werden der Funktion die beiden Vektoren der jeweils zueinanderpassenden Verkehrsflüsse (der Zählstellen) und der Standorte übergeben, wodurch das Netzwerk erstellt wird. Anschließend kann mit der Funktion *sim*[23] zu jedem beliebigen Standort der Verkehrsfluss berechnet werden, indem man das Netzwerk und die Daten der Standorte der Rastpunkte der Funktion übergibt. Somit kommt man zu den Verkehrsflussdaten an den Rastpunkten, welche für beide Richtungen jeder Autobahn und Schnellstraße in Österreich berechnet wurden. Sollte eine Rastanlage von beiden Fahrtrichtungen befahrbar sein, so ergeben sich für diese zwei verschiedene Verkehrsflüsse, die für die weitere Berechnung als Summe der beiden angesehen werden kann. Um eine Vorstellung für diese Vorgehensweise zu bekommen, wird die Methode für den Verkehrsfluss entlang der A1 in Richtung Walserberg in Abbildung 2 bildlich aufgezeigt.

Darin werden die tatsächlichen Verkehrsflüsse an den Zählstellen in Blau, die berechneten Verkehrsflüsse an den Rastpunkten in Grün und die Approximation für den interessierenden Bereich des Regressionsnetzwerks in Rot dargestellt.

[22] vgl. https://de.mathworks.com/help/nnet/ref/newgrnn.html?s_tid=doc_ta (abgerufen am 01.02.2018)
[23] vgl. https://de.mathworks.com/help/simulink/slref/sim.html (abgerufen am 02.02.2018)

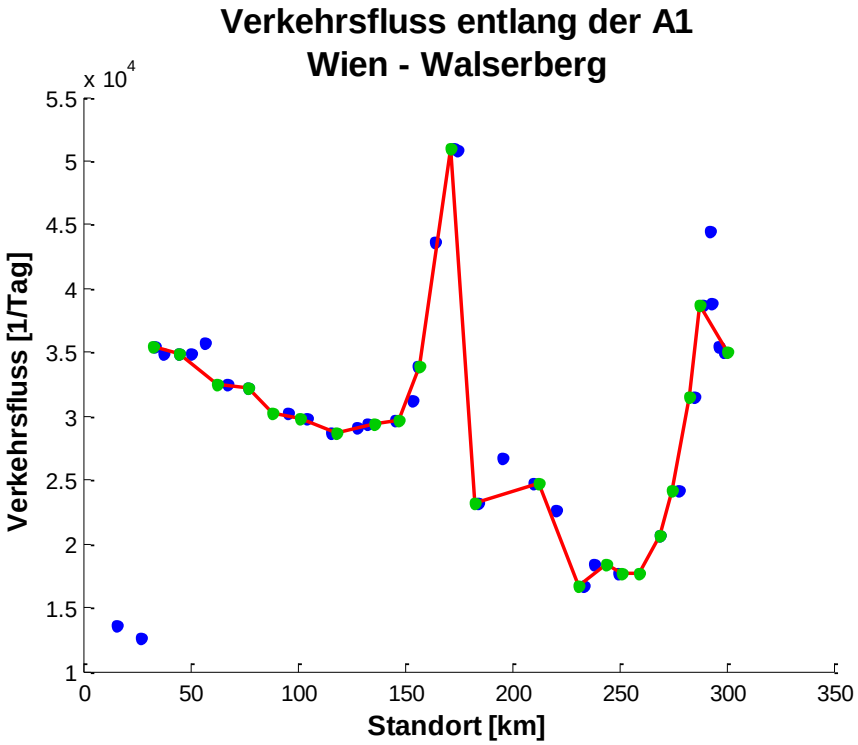

Abbildung 2: Verkehrsflussberechnung entlang der A1, Richtung Wien - Walserberg

Das gesamte österreichische Autobahnen- und Schnellstraßennetz inklusive aller Rastpunkte ist in Abbildung 3 grafisch dargestellt. Die Bedeutung der Richtungen wurde bereits im Kapitel 3.1. erklärt. Insgesamt gibt es in Österreich 243 Rastpunkte (Stand 17.01.2018), ohne jene der Schnellstraße S37. Dies ist die Ausgangslage für das gesamte folgende Modell.

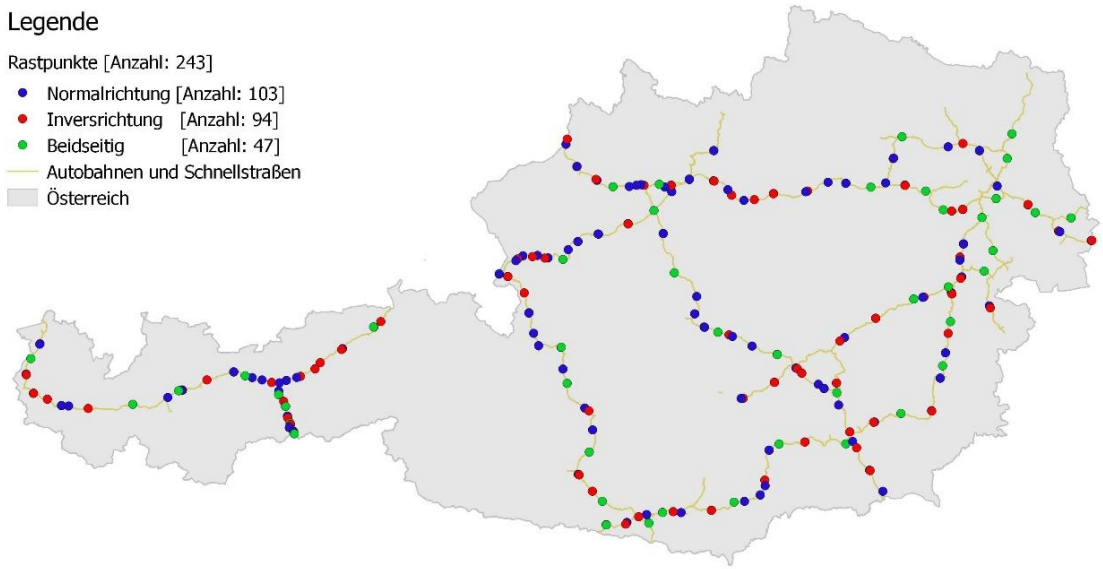

Abbildung 3: Autobahnen, Schnellstraßen und Rastpunkte in Österreich

3.3. Energiebedarfsberechnung

Zur Berechnung des Energiebedarfs an jedem Rastpunkt, wird der vorhin berechnete Verkehrsfluss je Rastpunkt verwendet. Der Energiebedarf pro Elektrofahrzeug ergibt sich allgemein gesehen aus dem Produkt der zurückgelegten Strecke und dem spezifischen Energieverbrauch. In diesem Fall ist die gefahrene Distanz durch die Abstände der Rastpunkte gegeben. Durch Multiplikation dieser Distanzen mit der Anzahl der Elektrofahrzeuge (= Verkehrsfluss) und dem spezifischen Energieverbrauch ergibt sich der gesamte Energiebedarf für einen Rastpunkt, der sich seit dem davorliegenden Rastpunkt angesammelt hat.

3.4. Optimierungsmodell

In diesem Abschnitt wird zunächst ein Optimierungsproblem formuliert, das die optimale räumliche Verteilung von Ladestationen in Österreichs Fernverkehrsnetz zum Ziel hat. Dafür werden diverse technische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen festgelegt, die wesentlich für die Modellierung sind. Durch Variation der vorkommenden Parameter können anschließend mehrere unterschiedliche Szenarien erstellt, gelöst und analysiert werden.

Als Zielfunktion der Optimierung wird der maximale Profit der Ladestationenbetreiber pro Tag berechnet. Dazu werden mehrere Optimierungsvariablen verwendet, die im Anschluss an das Modell genau beschrieben werden. Die Nebenbedingungen sind für die optimale Verteilung der Ladestationen und Ladesäulen verantwortlich.

Das entworfene Modell wird damit wie folgt formuliert:

- Zielfunktion:

$$\max_{x_i, y_i, e_{\text{Laden}}, e_{\text{zu}}, e_{\text{ab}}} e = \sum_i e_i^{\text{Laden}} \cdot (c_{\text{el}} - c_{\text{tax}}) - \sum_i \frac{1}{365 \cdot RBF} [c_{\text{fix}} \cdot x_i + c_{\text{var}} \cdot y_i] \tag{1}$$

- Nebenbedingungen:

$$\sum_i x_i = h \tag{2}$$

$$y_i < x_i \cdot k \tag{3}$$

$$E^{\mathrm{Ges}} = \hat{f} \cdot \overline{E^{\mathrm{EV}}} \tag{4}$$

$$e_i^{\mathrm{Bedarf}} = d_{i-1,i} \cdot f_i \cdot \Delta E \cdot \eta^{\mathrm{EV}} \tag{5}$$

$$e_i^{\mathrm{Laden}} \leq y_i \cdot E^{\mathrm{Ges}} \tag{6}$$

$$e_i^{\mathrm{Laden}} - e_i^{\mathrm{Bedarf}} - e_i^{\mathrm{Zu}} + e_i^{\mathrm{Ab}} = 0 \tag{7}$$

$$e_i^{\mathrm{Zu}} = e_{i-1}^{\mathrm{Ab}} \tag{8}$$

$$e_i^{\mathrm{Zu}} < \frac{\sum_i e_i^{\mathrm{Bedarf}}}{243} \tag{9}$$

$$e_i^{\mathrm{Ab}} < \frac{\sum_i e_i^{\mathrm{Bedarf}}}{243} \tag{10}$$

Der Rentenbarwertfaktor RBF lässt sich mit folgender Formel zu

$$RBF = \frac{1}{p} - \frac{1}{p(1+p)^T} \tag{11}$$

berechnen, wobei p für den Kalkulationszinssatz und T für die Anzahl der Perioden steht.

i - Knoten des Netzwerks, an dem eine Ladestation errichtet werden kann

x_i - Binäre Optimierungsvariable zur Errichtung einer Ladestation am Knoten i

y_i - Ganzzahlige Optimierungsvariable - Anzahl der Ladesäulen am Knoten i

e_i^{Laden} - Energiemenge, die durch die Ladesäulen am Knoten i geladen wird [kWh]

e_i^{Bedarf} - Ladebedarf am Knoten i [kWh]

e_i^{Zu} - Energiemenge, die von Knoten $i-1$ herrührt [kWh]

e_i^{Ab} - Energiemenge, die zu Knoten $i+1$ verlagert wird [kWh]

c_{el} - Energiepreis für den Endkunden [€/kWh]

c_{tax} - Gesamtpreis für alle Steuern und Abgaben (inkl. Großhandelspreis) [€/kWh]

E^{Ges} - Energiemenge, die pro Ladesäule und pro Tag geladen werden kann [kWh]

$\overline{E^{\text{EV}}}$ - Durchschnittliche Energiemenge, die pro Fahrzeug geladen wird [kWh]

ΔE - Spezifischer Energieverbrauch eines Elektrofahrzeugs [kWh/km]

f_i - Verkehrsfluss am Knoten i

$\hat{f}$ - Maximale Anzahl an Fahrzeugen, die pro Ladesäule pro Tag vollladen können

RBF - Rentenbarwertfaktor

c_{fix} - Gesamtkosten pro Ladestation [€]

c_{var} - Gesamtkosten pro Ladesäule [€]

η^{EV} - Anteil an Elektrofahrzeugen

h - Maximale Anzahl an Ladestationen

k - Maximale Anzahl an Ladesäulen pro Ladestation

Wie im Modell zu sehen ist, wird über mehrere Variablen optimiert. Zwei davon sind die binäre Optimierungsvariable x_i, die darüber entscheidet ob eine Ladestation am Knoten i errichtet wird oder nicht und die ganzzahlige Optimierungsvariable y_i, die die Anzahl der Ladesäulen pro Ladestation angibt. Die anderen drei Optimierungsvariablen stehen im Zusammenhang mit der Energiebilanz für jeden Knotenpunkt. Nachdem der Ladebedarf in jedem Knoten über Formel (5) bestimmt ist, bleibt die freie Wahl für die Optimierung an welchen Knoten wieviel geladen wird, sodass stets die Knotenbilanz erfüllt ist.

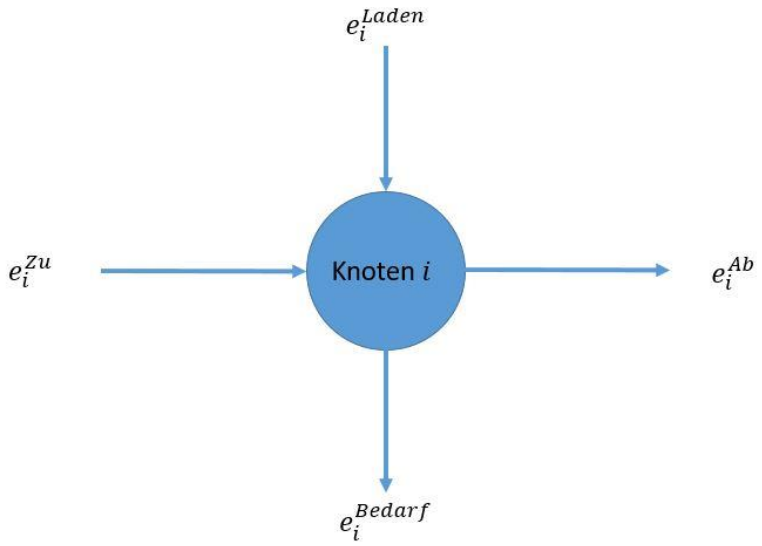

Abbildung 4: Energiebilanz für einen Knoten im Netzwerk

In Abbildung 4 wird die Energiebilanz für einen Knotenpunkt im Netzwerk grafisch dargestellt, welcher einem Rastpunkt im Fernverkehrsnetz entspricht. In jedem Knoten des Modells gibt es schematisch gesehen zwei Eingänge und zwei Ausgänge der Energie. Fest vorgegeben ist der Energiebedarf e_i^{Bedarf} in jedem Knoten, der bereits im vorherigen Kapitel berechnet wurde. Dem Modell bleiben somit die drei anderen Energie-Parameter für die Optimierung übrig. In jeden Knoten mündet eine Energie e_i^{Zu}, die vom Knoten $i-1$ weitergereicht wird. Dementsprechend kann auch eine Energie e_i^{Ab} an den nächsten Knoten $i+1$ weitergegeben werden. Die Optimierungsvariable e_i^{Laden} gibt an, wieviel Energie an dem jeweiligen Knoten durch die dort platzierten Ladesäulen geladen wird. Als Maximum für die weitergegebene Energiemenge wird der durchschnittliche Energiebedarf eines Rastpunktes verwendet, um eine bestmögliche Verteilung und Abdeckung zu gewährleisten. Dieser hängt direkt proportional mit dem Anteil an Elektrofahrzeugen zusammen, wie die Nebenbedingungen (5), (9) und (10) zeigen.

Der erste Term in der Zielfunktion (1) des Optimierungsmodells, gegeben als

$$\sum_i e_i^{\mathrm{Laden}} \cdot (c_{\mathrm{el}} - c_{\mathrm{tax}}),$$

beschreibt den täglichen Profit, der sich durch die Ladevorgänge aller Ladestationen ergibt. Der zweite Term in der Zielfunktion (1), ausgedrückt durch

$$\sum_i \frac{1}{365 \cdot RBF} [c_{\mathrm{fix}} \cdot x_i + c_{\mathrm{var}} \cdot y_i],$$

berücksichtigt die gesamten Investitionskosten aller Ladestationen und Ladesäulen, die sich pro Tag ergeben, durch Umrechnung mittels der Annuitätenmethode, damit ein Vergleich der beiden Terme möglich ist.

Durch die Nebenbedingungen werden die Anforderungen an die Errichtung der Ladestationen und Ladesäulen festgelegt. Durch (2) wird die maximale Anzahl an Ladestationen festgelegt, die vom Betreiber bestimmt werden kann. Diese kann zum Beispiel eine bestimmte Anzahl sein, die durch das Modell errichtet werden soll, aber ebenso ist es möglich diese nach oben offen zu lassen. In der Nebenbedingung (3) wird die maximale Anzahl an Ladesäulen pro Ladestation definiert. Dies ist deshalb von Vorteil, um eine Begrenzung an Ladesäulen pro Rastpunkt einzuführen zu können. In (4) wird jene Energiemenge berechnet, die eine Ladesäule pro Tag zu Verfügung stellen kann. Mit (5) wird der Energiebedarf für jeden Knotenpunkt des Netzwerks berechnet. Mit Hilfe der nächsten Bedingung (6) wird

sichergestellt, dass mindestens so viel Ladekapazität installiert ist, wie an dem jeweiligen Knoten benötigt wird, um den berechneten Ladebedarf abzudecken. Durch (7) wird die Energiebilanz für jeden Knoten im Netzwerk aufgestellt. Mit der Nebenbedingung (8) wird festgelegt, dass die am Knoten i ankommende Energiemenge stets gleich groß ist wie jene Energiemenge, die vom Knoten $i-1$ abgegeben wird. Die letzten beiden Bedingungen (9) und (10) legen die maximale Energiemenge fest, die von einem Knotenpunkt im Netz zum Nächsten weitergereicht werden kann. Das ist deshalb wichtig, da sonst lediglich am Anfang und am Ende einer Autobahn jeweils eine Ladestation mit den benötigten Ladesäulen errichtet werden würde, um den gesamten Energiebedarf zu decken. Damit wäre keine optimale Verteilung und Abdeckung des Verkehrsnetzes möglich.

3.4.1. Annahmen zum Modell – Definition des Status Quo

Im Zuge der Optimierung müssen für manche Variablen Werte angenommen werden, die sich auf Erfahrungswerte stützen, da es zurzeit noch keine verlässlichen Datenquellen dazu gibt. Da es in dieser Arbeit allerdings ohnehin vorrangig um die Entwicklung der Methode und des Modells geht, ist es zunächst nur wichtig, dass die angenommen Werte in realistischen Größenordnungen zu liegen kommen. Deswegen wurden in einem ersten Schritt folgende Werte für die Modellierung angenommen, die allerdings im Laufe der Szenarien variiert werden um deren Einflüsse zu analysieren und zu bewerten.

Folgende Initialwerte werden für die erste Modellierung verwendet:

$$c_{\text{fix}} = 50\,000\ € \tag{12}$$

$$c_{\text{var}} = 10\,000\ € \tag{13}$$

$$c_{\text{el}} = 0{,}25\ \frac{€}{\text{kWh}} \tag{14}$$

$$c_{\text{tax}} = 0{,}15\ \frac{€}{\text{kWh}} \tag{15}$$

$$\eta^{\text{EV}} = 0{,}03\ \% \tag{16}$$

$$\bar{E}^{\text{EV}} = 20\ \text{kWh} \tag{17}$$

$$\hat{f} = 20 \tag{18}$$

$$\Delta E = 0{,}2\ \frac{\text{kWh}}{\text{km}} \tag{19}$$

- In den Gesamtkosten für die Ladestationen (12) und Ladesäulen (13) sind alle Kosten inkludiert, die mit der Errichtung einer Ladestation einhergehen. Beispiele für die Kosten wären die Ladestation selbst, die Installationskosten, die Anschlusskosten und der Parkplatz.
- Der Energiepreis des Kunden (14) entspricht ziemlich genau dem, den der Kunde beim derzeit größten Ladeinfrastrukturanbieter Österreichs (Smatrics) im Tarif „Smart Net", welcher einer regelmäßigen Nutzung der öffentlichen Ladeinfrastruktur entspricht, zahlen muss.[24]
- Für die gesamten Steuern, Abgaben (inkl. Großhandelspreis) (15) wurde der durchschnittliche Gewerbepreis verwendet, den ein Gewerbe laut Energie-Control Austria im März 2018 zu zahlen hatte.[25] Dieser bleibt für alle folgenden Modellierungen gleich.
- Der Anteil an Elektrofahrzeugen (16) ist der aktuelle Stand (2017) und wurde vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie übernommen.[26] Im Jahr 2017 gab es diesem Auszug zufolge 14.618 zugelassene Elektrofahrzeuge von insgesamt 4.898.578 zugelassenen Personenkraftwagen, was einem Anteil von ca. 0,3 % entspricht.
- Für die durchschnittliche Lademenge (17) wurde ein Wert herangezogen, der selbst mit beschleunigtem Laden in einer Stunde geladen werden kann. Außerdem ist damit eine Reichweite von ungefähr weiteren 100 km (je nach Fahrzeug und Fahrweise) möglich.
- Dadurch ergibt sich zunächst die Anzahl von rund 20 Fahrzeugen, die pro Tag an einer Ladesäule vollgeladen werden können (18).

[24] vgl. https://smatrics.com/ladenetz (abgerufen am 20.02.2018)
[25] vgl. https://www.e-control.at/gewerbe-strompreis-monitor (abgerufen am 20.02.2018)
[26] vgl. https://www.bmvit.gv.at/verkehr/elektromobilitaet/downloads/oesterreich2017_de.pdf (abgerufen am 12.02.2018)

- Der durchschnittliche spezifische Energieverbrauch eines Elektrofahrzeugs (19) wurde zu 20 kWh pro 100 km gewählt, da der Wert erfahrungsgemäß zwischen 15 und 25 kWh pro 100 km je nach Fahrzeug, Fahrweise und Fahrverhältnissen zu liegen kommt.

Für die Auswertung des Modells wird angenommen, dass Rastpunkte, die von beiden Seiten befahrbar sind, im Allgemeinen größere Raststationen mit Tankstellen und Restaurant-Bereich, bevorzugt mit Ladestationen ausgebaut werden, da dort die Ladestationen aus kostentechnischen Gründen einfacher integriert werden können als bei einem einfachen Parkplatz. Zudem ist dort der Verkehrsfluss meist am höchsten, da die Verkehrsflüsse aus beiden Richtungen abgefangen werden können.

Zwei Dinge, die für dieses Modell unberücksichtigt bleiben, sind zum einen die Einbindung des vorhandenen Stromversorgungsnetzes von Österreich und die bis dato installierten Ladepunkte.

3.4.2.Skalierung des Modells

Wie das oben beschriebene Optimierungsmodell skaliert werden kann, wird in den folgenden Absätzen beschrieben. Zunächst werden die Zusammenhänge zwischen den wirtschaftlichen und technischen Aspekten mit dem Modell aufgezeigt. Anschließend wird darauf eingegangen, welche Parameter auf welche Art und Weise variiert werden können, um daraus unterschiedliche Szenarien zu generieren.

3.4.2.1. Wirtschaftliche Skalierung

Von der wirtschaftlichen Seite sind zunächst die Kosten für die Errichtung einer Ladestation interessant. In den letzten Jahren hat sich deutlich die Entwicklung hin zu höheren Ladeleistungen gezeigt. Dementsprechend könnte das Modell mit zunehmenden Investitionskosten skaliert werden, umso höher die Ladeleistung und damit die Anzahl der Elektrofahrzeuge, die pro Tag vollgeladen werden können, ist. Darin inbegriffen sind die höheren Installations- und Netzanschlusskosten, die sich durch die fortschreitende Technologie bemerkbar machen. Dafür gibt es in der Literatur allerdings keine geeigneten Daten, um die Kosten dementsprechend skalieren zu können.

Ein weiterer Punkt, der sich in Zukunft bemerkbar machen wird, ist die Entwicklung des Energiepreises. Dieser schlägt sich unmittelbar auf den Profit des Ladestationenbetreibers nieder und ist demnach auch als Parameter für das Modell zu untersuchen.

Der wohl wichtigste Punkt für die Modellierung ist der Anteil an Elektrofahrzeugen im Straßenverkehr. Mit aktuell 0,3 % ist Österreich zwar einer der Spitzenreiter in Europa, allerdings noch weit entfernt von einer kompletten Elektrifizierung. Trotzdem ist der Zuwachs an Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen sehr stark steigend und dementsprechend wird die Rolle des Elektrofahrzeugs einen immer größer werdenden Stellenwert erreichen. Aus diesem Grund ist die Skalierung vom Status Quo bis hin zur kompletten Elektrifizierung eine sehr interessante Überlegung.

3.4.2.2. Technische Skalierung

Wie bereits in der Literaturrecherche erwähnt, liegt die Zukunft der Ladetechnologien bei möglichst kurzen Ladedauern, um in den Bereich von wenigen Minuten wie beim konventionell betriebenen Kraftfahrzeug zu kommen. Um dies zu bewerkstelligen muss sich die Ladeleistung in Zukunft noch enorm steigern. Hinsichtlich des Modells wird sich diesbezüglich vor allem die Anzahl der Elektrofahrzeuge, die pro Tag vollgeladen werden können, entsprechend erhöhen. Sollte ein Ladevorgang in Zukunft nur noch fünf Minuten dauern, so wären das im Idealfall 12 Ladevorgänge pro Stunde und pro Tag insgesamt 288, wenn die Ladestation komplett ausgelastet wäre. Noch dazu werden sich die Batteriekapazitäten in Zukunft und die damit verbundenen Reichweiten deutlich erhöhen. Dadurch wird der Bedarf an Ladestationen im Fernverkehrsnetz sinken, da die Fahrzeuge weniger oft zum Laden an Rastpunkten halten müssen.

3.5. Szenarien

Im folgenden Kapitel werden die unterschiedlichen Szenarien für das Optimierungsmodell formuliert. Es werden zunächst die Annahmen und Rahmenbedingungen beschrieben, die für die jeweiligen Szenarien gelten sollen, und anschließend der Grund, warum dieses Szenario gewählt wurde.

Für alle Szenarien wird für den Rentenbarwertfaktor, der für die Annuität der Investitionskosten benötigt wird, ein Kalkulationszinssatz von $p = 5\,\%$ und ein Berechnungszeitraum von $T = 10$ Jahren gewählt.

3.5.1. Status Quo

In einem ersten Szenario wird das Modell für den derzeitigen Stand der Elektromobilität in Österreich modelliert. Unabhängig von den aktuell platzierten Ladestationen in Österreichs Autobahn- und Schnellstraßennetz, wie sie bereits im Kapitel 2.1. beschrieben worden sind, soll eine optimale Platzierung der Ladestationen im Fernverkehrsnetz von Österreich gefunden werden. Dafür werden die Annahmen aus dem Unterkapitel 3.4.1. verwendet. Das bedeutet vor allem, dass der aktuelle Ladebedarf der 0,3 % Elektrofahrzeuge abgedeckt werden soll und zugleich der maximal mögliche Profit berechnet wird. Außerdem wird ein unbegrenztes Budget und eine unbegrenzte Anzahl an Ladestationen und Ladesäulen vorausgesetzt, damit in dieser Hinsicht keine Beschränkung zur Geltung kommt.

Dieses Szenario soll den Unterschied zwischen der aktuellen und einer idealisierten Ladeinfrastruktur, wie sie durch das Modell berechnet wird, für den aktuell herrschenden Ladebedarf aufzeigen.

3.5.2. Substitution des gesamten fossilen Personenverkehrs durch Elektromobilität

Das nächste Szenario beschäftigt sich mit dem steigenden Anteil an Elektrofahrzeugen in Österreich. Ausgehend vom Status Quo wird das Modell nun so angepasst, dass der Anteil an Elektrofahrzeugen unter sonst gleichen Bedingungen von $\eta^{\mathrm{EV}} = 0{,}03\,\% \ldots 100\,\%$ variiert wird. Die Beschränkung der maximalen Ladestationen und der maximalen Ladesäulen pro Ladestation wird ebenso fallen gelassen, um zu sehen, wie stark die Ladeinfrastruktur ausgebaut werden müsste, wenn in Österreich der Fernverkehr rein elektrisch betrieben wäre. Damit wird die Fragestellung beantwortet, wie hoch der Umsatz und Profit der Ladestationenbetreiber in Zukunft ungefähr sein wird.

Außerdem wird mit diesem Szenario ein Ausblick in die langfristige Zukunft gewährleistet, wobei die Weiterentwicklung der Ladetechnologien und der Elektrofahrzeuge außer Acht gelassen wird, da dies in einem eigenen Szenario untersucht wird.

3.5.3. Technologische Entwicklung der Ladestationen und Elektrofahrzeuge

In einem weiteren Szenario wird die zukünftige technologische Entwicklung der Ladestationen und Elektrofahrzeuge berücksichtigt. Zum einen wird die höhere Ladeleistung und damit die Anzahl der Fahrzeuge, die pro Tag vollgeladen werden können eine Rolle spielen. Zum anderen wird die fortschreitende Batterietechnologie für eine größere Reichweite in der E-Mobilität sorgen. Diese beiden Ansätze werden zunächst getrennt betrachtet und anschließend deren gemeinsame Auswirkung aufgezeigt.

Für beide Ansätze wird von den Initialwerten wie in Kapitel 3.4.1. ausgegangen, unter der Voraussetzung, dass sowohl keine Beschränkung für die Anzahl der Ladestationen und Ladesäulen besteht als auch ein unbeschränktes Budget vorhanden ist.

Im ersten Fall wird die Entwicklung der Ladeleistung untersucht, unabhängig von der Batteriekapazität. Dafür wird der Parameter $\hat{f}$ ausgehend vom Initialwert 20 solange gesteigert, bis im Idealfall die Ladedauer so kurz wie ein herkömmlicher Tankvorgang dauert. Wie bereits im Kapitel 3.4.2.2. erwähnt, ergäbe sich unter Idealbedingungen eine Anzahl von 288 Fahrzeugen pro Tag, die vollgeladen werden können, wenn ein gesamter Ladevorgang nur fünf Minuten beträgt.

Im zweiten Fall wird die Entwicklung der Elektrofahrzeuge, im Detail die größer werdende Batteriekapazität, analysiert. Dafür wird der Parameter $\bar{E}^{\mathrm{EV}}$, der die durchschnittliche geladene Energie eines Elektrofahrzeugs beschreibt, ausgehend vom Status Quo gesteigert. Dieser ist in erster Linie für die Reichweite der Fahrzeuge verantwortlich. Umso größer die Reichweite ist, desto weniger oft muss stehengeblieben werden um wiederaufzuladen. Dementsprechend muss aber auch eine größere Energiemenge nachgeladen werden, was zu einer höheren Ladedauer führt. Damit können wiederum weniger Fahrzeuge pro Ladesäule pro Tag vollgeladen werden. Wird zum Beispiel der Parameter $\bar{E}^{\mathrm{EV}}$ verdoppelt, so muss der

Parameter $\hat{f}$ halbiert werden, wenn die Ladeleistung gleich bleibt. Damit ist klar, dass die beiden Parameter $\hat{f}$ und $\bar{E}^{\mathrm{EV}}$ einen direkten Zusammenhang aufweisen.

Abschließend soll mit diesem Szenario die Kombination dieser beiden Entwicklungen untersucht werden, wie es auch in der Praxis sein wird, da sich sowohl die Ladeleistung als auch die Batteriekapazität erhöhen wird. Dazu werden für die beiden Parameter die Werte $\bar{E}^{\mathrm{EV}} = 100\,\mathrm{kWh}$ und $\hat{f} = 240$ angenommen, was bei einer kompletten Auslastung der Ladestation zu einer Ladeleistung von 1 MW führt. Diese Zahl ist für die heutigen Verhältnisse vielleicht noch utopisch, aber in einigen Jahren vielleicht nicht mehr so weit entfernt von der Realität. Die Ladedauer in diesem Fall beträgt ideal betrachtet sechs Minuten.

3.5.4. Ladestrompreisentwicklung

In diesem Szenario wird die Auswirkung der Strompreisentwicklung auf den Umsatz und Profit des Ladestationenbetreibers in Zusammenhang mit dem Ausbau der Ladeinfrastruktur beschrieben. Das wird in Zukunft vor allem dann interessant, wenn ein strenger Wettbewerb zwischen den konventionellen Kraftfahrzeugen und den Elektrofahrzeugen aufgrund des Energiepreises und des Kraftstoffpreises herrscht. Für dieses Szenario wird angenommen, dass der Anteil an Elektrofahrzeugen 100 % beträgt und abermals keine Beschränkung hinsichtlich der Anzahl an Ladestationen, Ladesäulen und dem Budget besteht. Es wird ausschließlich der Parameter des Energiepreises variiert und dafür das Modell berechnet, wobei sowohl eine Erhöhung als auch Senkung berücksichtigt und anschließend analysiert wird.

Der Energiepreis wird ausgehend von $c_{\mathrm{el}} = 0{,}1\ \frac{€}{\mathrm{kWh}}$ bis hin zu $c_{\mathrm{el}} = 0{,}4\ \frac{€}{\mathrm{kWh}}$ in 5 Cent Schritten variiert und dafür werden die Umsätze und Profite des Ladestationenbetreiber berechnet.

3.5.5. Urlauberverkehr

Das letzte Szenario beschäftigt sich mit den Auswirkungen eines starken Urlauberverkehrs. Damit soll der Extremfall aufgezeigt werden, was passiert, wenn z.B. an einem Pfingstwochenende ein wesentlich höherer Verkehrsfluss entlang der A2, um eine Reiseroute von Wien nach Italien und umgekehrt zu simulieren, herrscht. Wie dann der Ausbau der

Ladeinfrastruktur idealerweise aussehen müsste, um diesen erhöhten Bedarf abdecken zu können, wird mit diesem Szenario analysiert.

Dafür wird der Verkehrsfluss und der damit verbundene Energiebedarf, der sich entlang der A2 ergibt, mit einem Faktor 5 multipliziert, um solch einen höheren Urlauberverkehr zu berücksichtigen. Ansonsten werden dieselben Annahmen wie im Szenario „Status Quo“ angenommen, um diese Situation für aktuelle Verhältnisse zu beurteilen.

3.5.6. Überblick der Szenarien

In diesem Unterkapitel werden die markanten Unterschiede der einzelnen Szenarien anhand der Tabelle 1 durch Kennzeichnung der verschiedenen Parameter aufgezeigt. Das Szenario „Urlauberverkehr“ hat dieselben Parametergrößen wie das Szenario „Status Quo“, allerdings wurde der der Verkehrsfluss entlang der A2 verfünffacht, wie dies bereits im Kapitel 3.5.5. beschrieben wurde.

Tabelle 1: Überblick der Parametervariationen der einzelnen Szenarien

↓ Szenario / Parameter →	c_{el}	$\hat{f}$	$\overline{E}^{\mathrm{EV}}$	η^{EV}
Status Quo	0,25 €/kWh	20	20 kWh	0,3 %
Substitution des gesamten fossilen Verkehrs durch Elektromobilität	0,25 €/kWh	20	20 kWh	**0,3 % … 100 %**
Technologische Entwicklung der Ladestationen und Elektrofahrzeuge	0,25 €/kWh	**20 - 288**	**20 – 100 kWh**	100 %
Ladestrompreisentwicklung	**0,1 €/kWh-0,4 €/kWh**	20	20 kWh	100 %
Urlauberverkehr	0,25 €/kWh	20	20 kWh	0,3 %

4.Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der vorhin beschriebenen Szenarien präsentiert. Die Modellierung erfolgte mittels Matlab und die grafische Auswertung mittels QGIS. Die folgenden Abbildungen zeigen den Ausbau der Ladeinfrastruktur des jeweiligen Szenarios. Dabei sind die Rastpunkte, an denen eine Ladestation errichtet werden soll, mit unterschiedlichen Farben gekennzeichnet. Es wurde ein Farbverlauf von Gelb nach Rot gewählt, um die Anzahl der Ladesäulen pro Ladestation darzustellen. Die tatsächliche Anzahl an Ladesäulen pro Rastpunkt sind in den jeweiligen Legenden genauer beschrieben, aber prinzipiell steht der Verlauf von Gelb nach Rot für eine geringe bis zu einer hohen Anzahl an Ladesäulen. Zusätzlich ist die Größe der Punkte so skaliert, dass ein größer werdender Durchmesser einer steigenden Anzahl an Ladesäulen entspricht.

4.1. Status Quo

Im ersten Szenario wird der Fall des Status Quo betrachtet. Das bedeutet, welche Ladeinfrastruktur für den aktuellen Anteil an Elektrofahrzeugen bereits implementiert sein sollte, um dessen Ladebedarf vollständig decken zu können.

Durch Auswertung des Optimierungsmodells, wie es unter den gegebenen Annahmen aus dem Kapitel 3.4.1. durchgeführt wurde, kommt man zu den Ergebnissen in Tabelle 2 für die Anzahl der Ladestationen und Ladesäulen, den Umsatz pro Jahr, den Profit pro Jahr, den Profit pro Ladesäule pro Jahr und die gesamten Investitionskosten. Insgesamt würde der Umsatz 4,33 Mio. € pro Jahr betragen, der Profit allerdings nur 0,3 Mio. €. Dadurch resultiert ein Profit von 1528 € pro Ladesäule pro Jahr. Diese Tatsache kommt daher, dass für den aktuellen Anteil an Elektrofahrzeugen von 0,3 % die Investitionskosten relativ hoch sind und der Energiebedarf relativ niedrig ist.

Tabelle 2: Ergebnisse der Modellierung für den Status Quo – präsentiert werden die Anzahl der Ladestationen, die Anzahl der Ladesäulen, der Umsatz pro Jahr, der Profit pro Jahr, der Profit pro Ladesäule pro Jahr und die Gesamtinvestitionskosten

Anzahl der Lade-stationen	Anzahl der Ladesäulen	Umsatz pro Jahr	Profit pro Jahr	Profit pro Ladesäule pro Jahr	Gesamt-investitions-kosten
163	196	4,33 Mio. €	0,3 Mio. €	1528€	10,11 Mio. €

In Abbildung 5 wird die grafische Übersicht für den Ausbau der Ladeinfrastruktur gegeben. Darin ist zu sehen, dass die maximale Anzahl an Ladesäulen für eine Ladestation die Zahl 4 nicht überschreitet. Die meisten Ladestationen sind lediglich mit einer einzigen Ladesäule ausgestattet, um den herrschenden Energiebedarf und die Abdeckung zu gewährleisten.

Ein Vergleich mit der aktuellen Situation der Ladeinfrastruktur im Fernverkehrsnetz in Österreich, wie es in der Literatur gezeigt wurde, zeigt, dass die durch das Modell berechnete ideale Platzierung von Ladestation sehr gut mit der aktuellen Lage übereinstimmt (siehe Kapitel 2.1.).

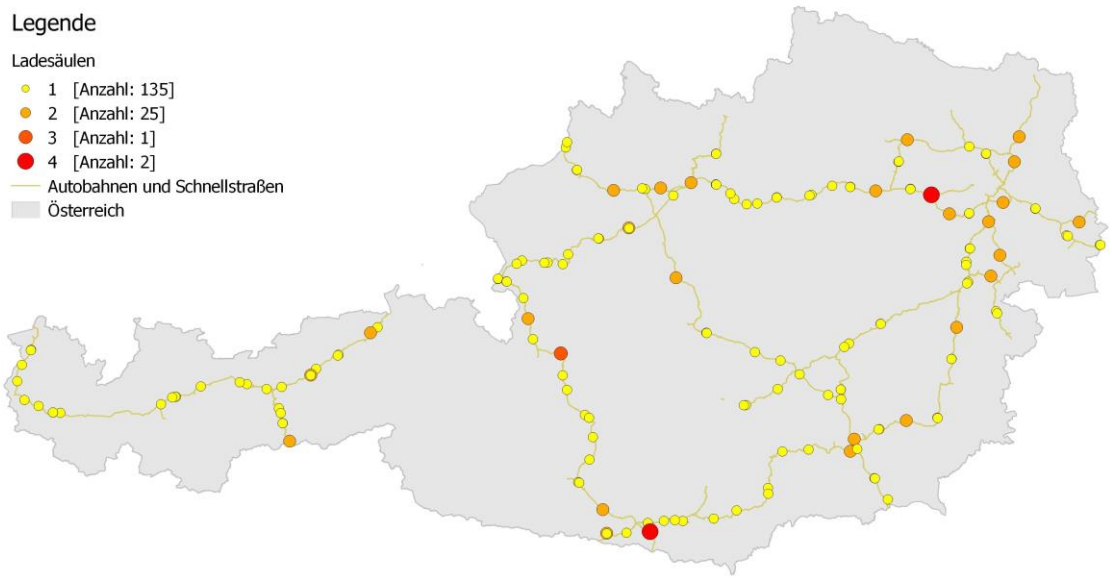

Abbildung 5: Optimale räumliche Verteilung der Ladestationen des Szenarios "Status Quo"

4.2. Substitution des gesamten fossilen Personenverkehrs durch Elektromobilität

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse für das Szenario „Substitution des gesamten fossilen Personenverkehrs durch Elektromobilität“ präsentiert. Ausgehend vom Status Quo wurde der EV-Anteil bis hin zur kompletten Elektrifizierung der PKWs des Fernverkehrs variiert, wie bereits in den Annahmen aus dem Kapitel 3.5.2. beschrieben.

In Tabelle 3 werden die Ergebnisse der Auswertung des Optimierungsmodells präsentiert, die für einen gegebenen EV-Anteil die Anzahl der Ladestationen, die Anzahl der Ladesäulen, den

Umsatz pro Jahr, den Profit pro Jahr und den Profit pro Ladesäule pro Jahr beinhalten. Interessant ist, dass sich die Anzahl der Ladestationen nur marginal ändert. Vermutlich ist sind dafür die Nebenbedingungen (9) und (10) verantwortlich, die gewährleisten, dass eine optimale Verteilung und Abdeckung vorhanden ist. Die Anzahl der Ladesäulen steigt jedoch in etwa linear mit der Anzahl der Elektrofahrzeuge an, was durch den linearen Anstieg des Energiebedarfs zu erklären ist. Des Weiteren ergibt sich für dieses Szenario bei einem Anteil von 100 % an Elektrofahrzeugen ein Gesamtumsatz von etwa 1,44 Mrd. € und ein Gesamtprofit von 525 Mio. € pro Jahr, was in späterer Folge mit dem Treibstoffverbrauch in Österreich verglichen wird um dessen Größenordnung zu beurteilen. Ein weiterer Punkt ist, dass sich der Profit pro Ladesäule pro Jahr bei knapp über 13.000 € einpendelt. Diese Tatsache macht deutlich, dass die Investitionskosten mit steigendem EV-Anteil zunehmend unbedeutender werden.

Tabelle 3: Ergebnisse der Modellierung der Substitution des gesamten fossilen Personenverkehrs durch Elektromobilität – präsentiert werden die Anzahl der Ladestationen und Ladesäulen, die Umsätze pro Jahr, die Profite pro Jahr und die Profite pro Ladesäule pro Jahr für gegebene EV-Anteile

EV-Anteil	Anzahl der Ladestationen	Anzahl der Ladesäulen	Umsatz pro Jahr	Profit pro Jahr	Profit pro Ladesäule pro Jahr
0,3%	163	196	4,3 Mio. €	0,3 Mio. €	1.528 €
1%	160	431	14,4 Mio. €	4,1 Mio. €	9.575 €
5%	162	2000	72,2 Mio. €	25,2 Mio. €	12.603 €
10%	163	3981	144,3 Mio. €	51,5 Mio. €	12.937 €
30%	163	11892	433,0 Mio. €	156,7 Mio. €	13.179 €
50%	164	19803	721,6 Mio. €	261,9 Mio. €	13.226 €
80%	164	31675	1,154 Mrd. €	419,7 Mio. €	13.251 €
100%	164	39580	1,443 Mrd. €	525,0 Mio. €	13.263 €

Der lineare Zusammenhang zwischen der Anzahl der Ladesäulen und dem Anteil an Elektrofahrzeugen ist in Abbildung 6 dargestellt. Ebenso ist darin der Profit pro Ladesäule pro Jahr über dem EV-Anteil aufgetragen

Die grafische Auswertung dieses Szenarios ist in Abbildung 7 gegeben. Damit wird deutlich, dass es mit dem heutigen Stand der Technik im Prinzip unmöglich wäre, den gesamten Energiebedarf für einen Anteil von 100 % Elektrofahrzeugen zu decken. Zwei Ladestationen müssten demnach mit mehr als 750 Ladesäulen ausgestattet werden, was schon aufgrund der enorm hohen Anzahl der Parkplätze auf diese Art und Weise nicht durchführbar wäre. Trotzdem ist es gerade deshalb interessant zu sehen, welche Herausforderungen der steigende Anteil an Elektrofahrzeugen mit sich bringt.

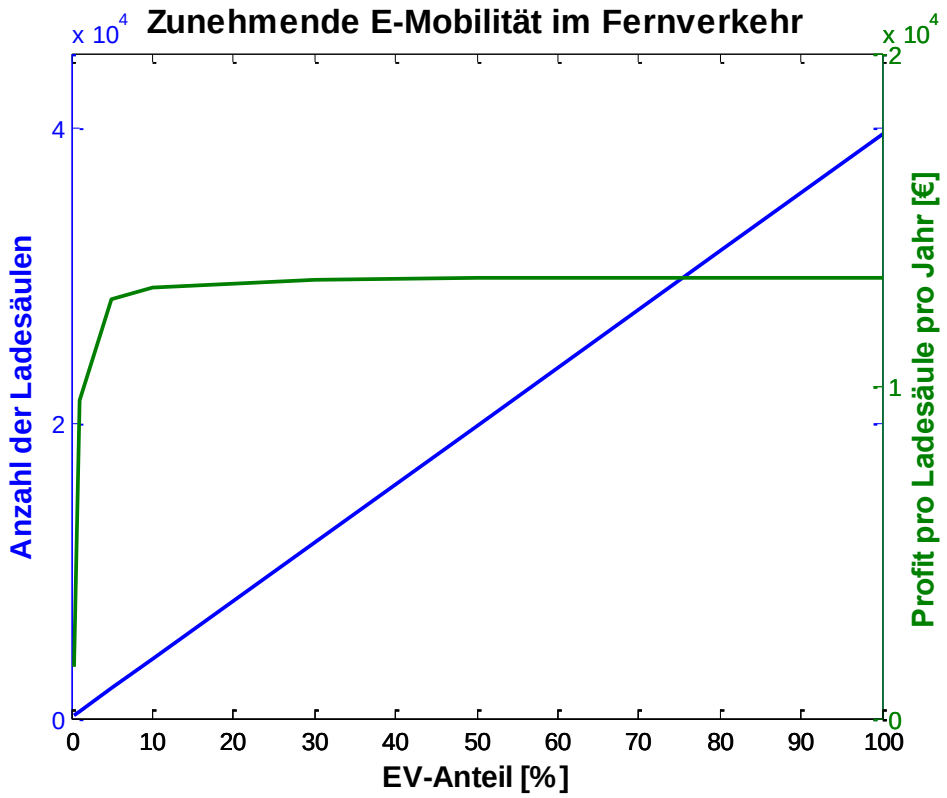

Abbildung 6: Linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl der Ladesäulen und dem EV-Anteil; Zusammenhang zwischen dem Profit pro Ladesäule pro Jahr und dem EV-Anteil

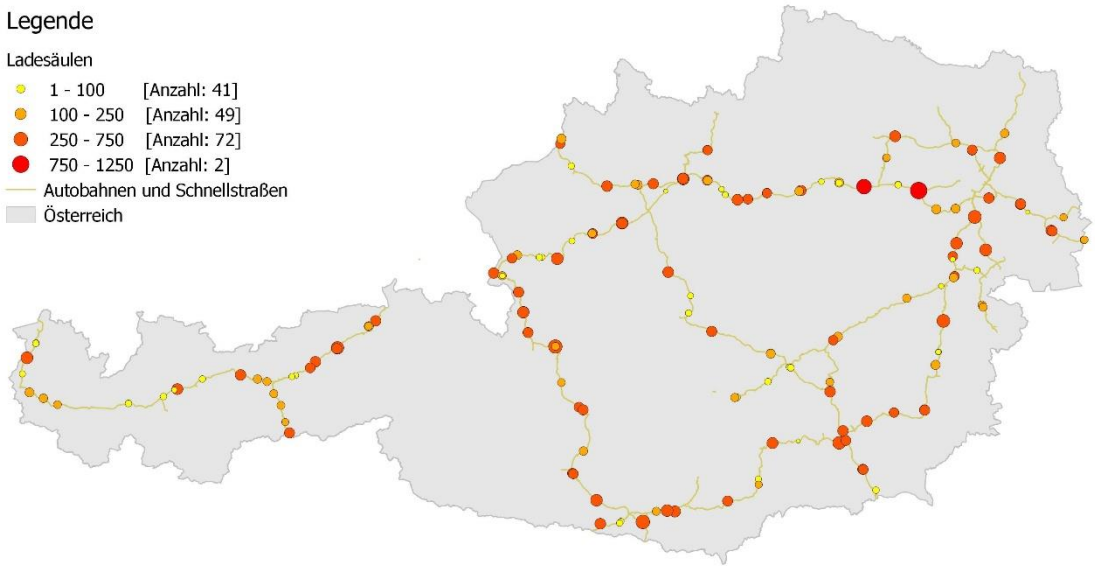

Abbildung 7: Optimale räumliche Verteilung der Ladestationen des Szenarios "Substitution des gesamten fossilen Personenverkehrs durch Elektromobilität“

4.3. Technologische Entwicklung der Ladestationen und Elektrofahrzeuge

In diesem Szenario wird die fortschreitende technologische Entwicklung der Ladestationen und der Batteriekapazität der Elektrofahrzeuge berücksichtigt. Wie bereits im Kapitel 3.5.3. beschrieben, wurden insgesamt drei verschiedene Fälle untersucht. Zum einen die Entwicklung der Ladestationen, zum anderen die Entwicklung der Batteriekapazität und im Anschluss dessen Kombination. Die Ergebnisse für dieses Szenario werden in den kommenden Absätzen präsentiert.

Im ersten Fall wurde die Anzahl der Fahrzeuge, die pro Tag an einer Ladesäule vollladen können, beschrieben durch den Parameter $\hat{f}$, vom Status Quo $\hat{f} = 20$ bis hin zu einer Anzahl von 288 variiert. Die Ergebnisse dieser Modellierung, wie die Anzahl der Ladestationen, die Anzahl der Ladesäulen, die Gesamtinvestitionskosten, der Profit pro Jahr und der Profit pro Ladesäule pro Jahr sind hierfür in Tabelle 4 zu finden. Der Gesamtumsatz bleibt für die Variation von $\hat{f}$ stets konstant bei 1,443 Mrd. € pro Jahr.

Tabelle 4: Modellierung der Entwicklung der Ladestationen – präsentiert werden die Umsätze pro Jahr, die Profite pro Jahr, die Profite pro Ladesäule pro Jahr und die Anzahl der Ladestationen und Ladesäulen für bestimmte Anzahlen von Fahrzeugen, die pro Ladesäule pro Tag vollgeladen werden können

Anzahl der Fahrzeuge, die pro Ladesäule pro Tag vollladen	Anzahl der Ladestationen	Anzahl der Ladesäulen	Gesamt-investitions-kosten	Profit pro Jahr	Profit pro Ladesäule pro Jahr
20	164	39580	404,0 Mio. €	525,0 Mio. €	13.263 €
40	164	19817	206,4 Mio. €	550,5 Mio. €	27.781 €
60	164	13229	140,0 Mio. €	559,1 Mio. €	42.261 €
80	163	9931	107,5 Mio. €	563,4 Mio. €	56.727 €
100	163	7956	87,7 Mio. €	565,9 Mio. €	71.130 €
120	163	6641	74,6 Mio. €	567,6 Mio. €	85.471 €
140	163	5695	65,1 Mio. €	568,8 Mio. €	99.883 €
160	163	4992	58,1 Mio. €	569,7 Mio. €	114.131 €
180	163	4437	52,5 Mio. €	570,5 Mio. €	128.569 €
200	163	4004	48,2 Mio. €	571,0 Mio. €	142.613 €
220	163	3646	44,6 Mio. €	571,5 Mio. €	156.744 €
240	163	3338	41,5 Mio. €	571,9 Mio. €	171.326 €
260	163	3084	39,0 Mio. €	572,2 Mio. €	185.543 €
288	163	2788	36,0 Mio. €	572,6 Mio. €	205.379 €

Dabei zeigt sich, dass der Parameter $\hat{f}$ im Prinzip keine Auswirkung auf die Anzahl der Ladestationen hat. Ganz anders ist der Zusammenhang mit der Anzahl der Ladesäulen. Desto höher die Anzahl, wie viele Fahrzeuge pro Ladesäule pro Tag vollgeladen werden können, desto weniger Ladesäulen werden benötigt. Dieser hyperbolische Zusammenhang ist in Abbildung 8 grafisch dargestellt. Ebenso ist darin der lineare Zusammenhang zwischen dem Profit pro Ladesäule pro Jahr und der Anzahl der Fahrzeuge, die pro Ladesäule pro Tag vollgeladen werden können eingezeichnet. Wird von einer tatsächlichen Ladedauer von nur fünf Minuten ausgegangen, so würden nur noch 2788 Ladesäulen in ganz Österreich benötigt werden, um den gesamten Energiebedarf der Elektrofahrzeuge abzudecken. Der Profit, der sich pro Jahr ergibt, steigt mit der zunehmenden Ladeleistung an, da die Investitionskosten geringer werden.

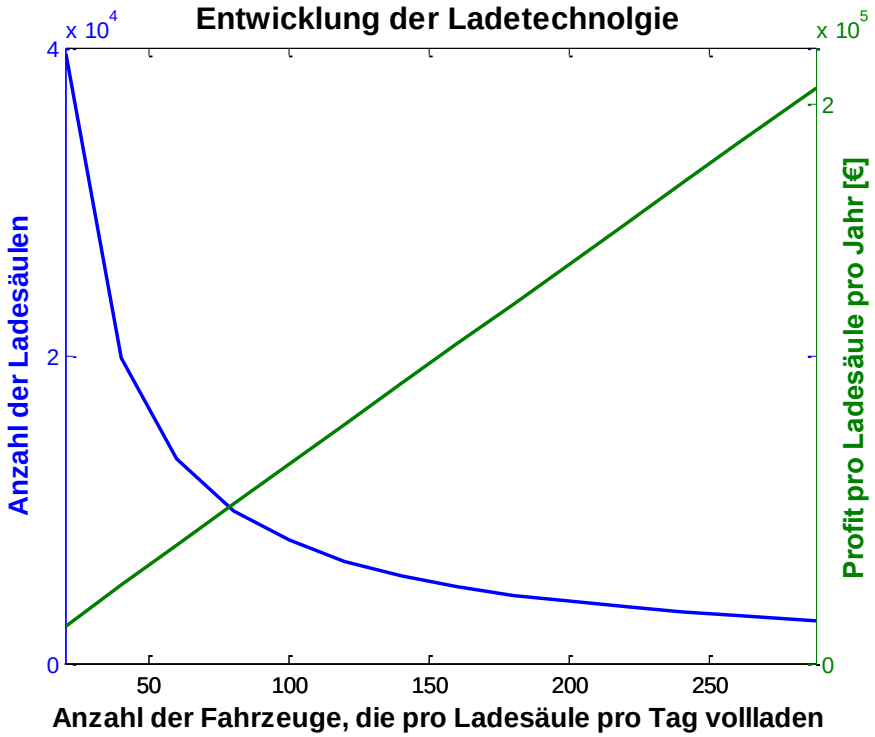

Abbildung 8: Hyperbolischer Zusammenhang zwischen der Anzahl der Ladesäulen bzw. ein linearer Zusammenhang zwischen dem Profit pro Ladesäule pro Jahr und der Anzahl an Fahrzeugen, die pro Ladesäule pro Tag vollgeladen werden können

Der zweite Fall, der eine größer werdende Batteriekapazität beschreiben sollte, bringt aus folgendem Grund keine neue Erkenntnis. Nachdem die Gesamtenergie, die eine Ladesäule pro Tag liefern kann, durch $\bar{E}^{\mathrm{Ges}} = \hat{f} \cdot \overline{E^{\mathrm{EV}}}$ gegeben ist und damit durch das Produkt aus der Anzahl der Fahrzeuge, die pro Tag vollgeladen werden können und der durchschnittlichen geladenen Energie pro Fahrzeug beschrieben wird, hebt sich der Effekt einer größer

werdenden Batteriekapazität mit der damit verbundenen längeren Ladedauer auf. Wird die Batteriekapazität beispielsweise verdoppelt, verdoppelt sich damit auch die Ladedauer und dadurch wiederum halbiert sich die Anzahl der Fahrzeuge, die pro Tag vollgeladen werden können. Damit bleibt die Gesamtenergie, die eine Ladesäule liefern kann, immer gleich und man kommt zum selben Ergebnis wie im Status Quo.

Nachdem der dritte Fall die eben präsentierten Ansätze kombiniert, wird sowohl die höhere Ladeleistung als auch die größere Batteriekapazität berücksichtigt. Das Ergebnis dieser Modellierung ist in Tabelle 5 zu finden.

Tabelle 5: Modellierung der technologischen Entwicklung der Ladestationen und Elektrofahrzeuge – präsentiert wird die Anzahl der Ladestationen, die Anzahl der Ladesäulen, der Umsatz pro Jahr, der Profit pro Jahr, der Profit pro Ladesäule pro Jahr und die Gesamtinvestitionskosten

Anzahl der Ladestationen	Anzahl der Ladesäulen	Umsatz pro Jahr	Profit pro Jahr	Profit pro Ladesäule pro Jahr	Gesamt-investitions-kosten
165	690	1,443 Mrd. €	575,6 Mio. €	833.762 €	15,15 Mio. €

Mit einer Anzahl von 690 Ladesäulen für das gesamte Fernverkehrsnetz von Österreich bringt dieses Szenario ein sehr plausibles Ergebnis für die Zukunft. Die maximale Anzahl an Ladesäulen pro Ladestation beträgt 18, was aus der Sicht der Parkplätze durchaus möglich wäre. Die einzige wahre Herausforderung für dieses Szenario und damit für die Zukunft bringt die extrem hohe punktuelle elektrische Leistung mit sich, da diese im Bereich von einigen Megawatt für einen einzelnen Rastpunkt, an dem eine Ladestation errichtet werden soll, zu liegen kommt. Dafür müssen für das Stromnetz geeigneten Maßnahmen getroffen werden, damit dies bewerkstelligt werden kann.

Die räumliche Verteilung der Ladestationen und Ladesäulen ist in Abbildung 9 zu sehen. Darin ist deutlich zu erkennen, dass mit einer Anzahl von 105 Ladestationen der Großteil der Ladestationen mit einer geringen Anzahl von 1 bis 4 Ladesäulen auskommt. Weitere 54 Ladestationen besitzen eine Anzahl zwischen 5 und 9 Ladesäulen und für nur insgesamt 7 Ladestationen ist eine Anzahl von mehr als 10 Ladesäulen erforderlich um den gesamten Ladebedarf zu decken.

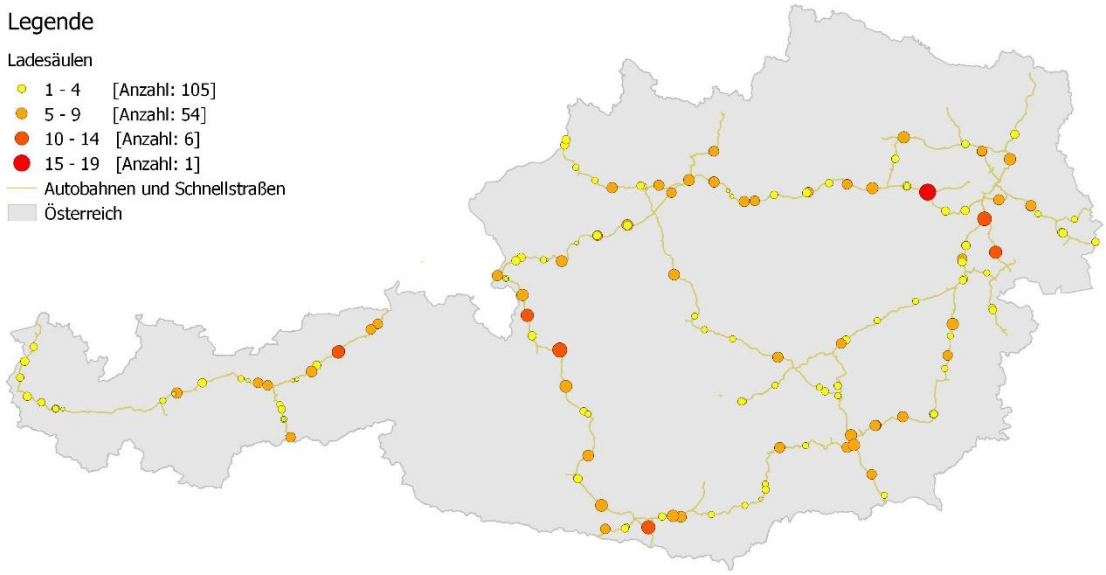

Abbildung 9: Optimale räumliche Verteilung der Ladestationen des Szenarios "Technologische Entwicklung der Ladestationen und Elektrofahrzeuge"

4.4. Ladestrompreisentwicklung

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse des Szenarios der Ladestrompreisentwicklung präsentiert. Wie bereits im Kapitel 3.5.4. beschrieben, wird mit diesem Szenario die Auswirkung des Ladestrompreises auf den jährlichen Umsatz des Ladestationenbetreibers aufgezeigt.

Durch Auswertung des Optimierungsmodells zeigt sich in diesem Szenario, dass der Parameter des Ladestrompreises ausschließlich eine direkte Auswirkung auf den Umsatz und Profit, den der Ladestationenbetreiber macht, aufweist. Die Anzahl der Ladestationen und Ladesäulen bleiben durch diese Variation unverändert wie im Szenario „Status Quo“. Ebenso die Verteilung der Ladestation und Ladesäulen bleibt unverändert, weshalb sie in diesem Fall auch nicht in den Ergebnissen präsentiert wird. Die Werte der Modellierung sind in Tabelle 6 zu sehen. Der lineare Zusammenhang zwischen dem Ladestrompreis und dem Umsatz bzw. Profit beschreibt, ist in Abbildung 10 grafisch dargestellt. Die Gewinnschwelle ist mit Rot markiert und zeigt, dass ungefähr ab einem Ladestrompreis von 16 Cent pro kWh mit einem Gewinn gerechnet werden kann.

Tabelle 6: Ergebnisse der Modellierung der Ladestrompreisentwicklung - präsentiert wird der Umsatz pro Jahr, der Profit pro Jahr und der Profit pro Ladesäule pro Jahr in Abhängigkeit vom Ladestrompreis

Ladestrompreis	Umsatz pro Jahr	Profit pro Jahr	Profit pro Ladesäule pro Jahr
0,10 €/kWh	577,3 Mio. €	- 341,0 Mio. €	- 8.615 €
0,15 €/kWh	865,9 Mio. €	- 52,3 Mio. €	- 1.322 €
0,20 €/kWh	1,155 Mrd. €	236,3 Mio. €	5.973 €
0,25 €/kWh	1,443 Mrd. €	525,0 Mio. €	13.263 €
0,30 €/kWh	1,732 Mrd. €	813,6 Mio. €	20.553 €
0,35 €/kWh	2,020 Mrd. €	1,102 Mrd. €	27.845 €
0,40 €/kWh	2,309 Mrd. €	1,391 Mrd. €	35.138 €

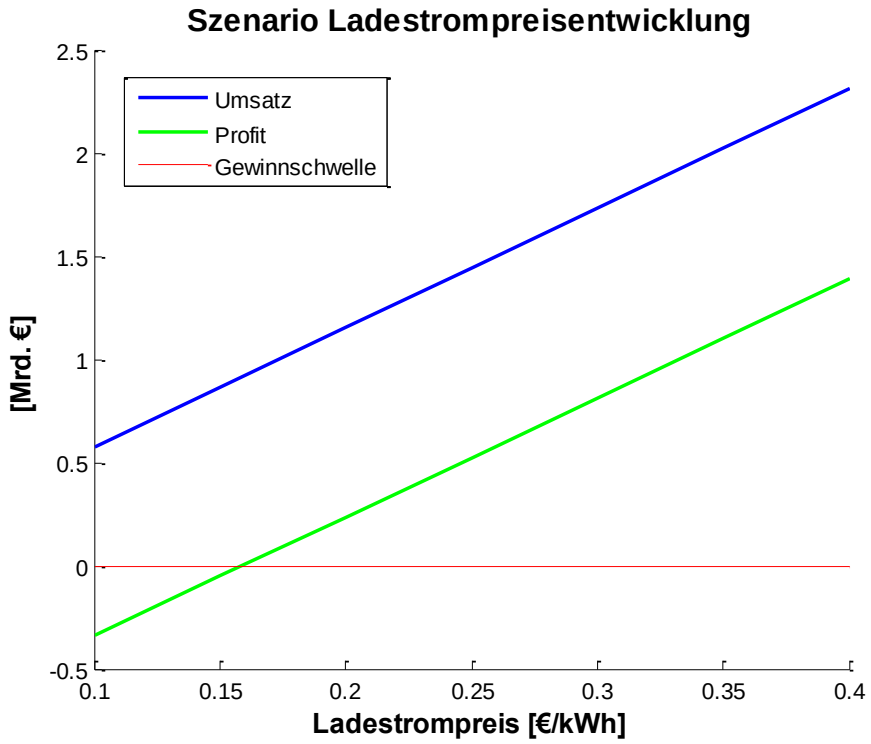

Abbildung 10: Linearer Zusammenhang zwischen dem Ladestrompreis und dem Umsatz bzw. Profit für das Szenario „Ladestrompreisentwicklung“

Sollte die Elektromobilität in Zukunft weiter so rasant an Bedeutung gewinnen wie in den letzten Jahren, so wird in Zukunft ein ständiger Wettbewerb zwischen dem Ladestrompreis und dem Kraftstoffpreis herrschen um die jeweilige Energiequelle, obgleich elektrische Energie oder fossile Brennstoffe, für den Kunden möglichst attraktiv zu halten. Aus diesem Grund wurde mit dem Szenario aufgezeigt, mit welchen Summen der Ladestationenbetreiber ungefähr rechnen kann. Sollte aufgrund eines zunehmenden Elektrofahrzeuganteils der Kraftstoffpreis sinken um Fahrzeuge mit konventionellen Kraftstoffen weiterhin attraktiv zu

halten, so müsste der Ladestrompreis ebenso geringer werden um wettbewerbsfähig zu bleiben.

4.5. Urlauberverkehr

Mit diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse für das Szenario „Urlauberverkehr“, dessen Annahmen im Kapitel 3.5. beschrieben wurden, präsentiert. In diesem Szenario ging es darum, einen möglichen Extremfall zu behandeln. Dafür wurde der Verkehrsfluss entlang der Autobahn A2 um den Faktor fünf erhöht, wodurch ein sehr starker Urlauberwechsel zwischen Österreich und Italien untersucht wird. Durch den höheren Verkehrsfluss erhöht sich ebenso der damit verbundene Energiebedarf entlang dieser Autobahn um den Faktor fünf, der durch zusätzliche Ladestationen und Ladesäulen abgedeckt werden muss.

Folgendes Ergebnis ergibt sich durch Auswertung des Optimierungsmodells für dieses Szenario.

Anzahl der Ladestationen: 178

Anzahl der Ladesäulen: 284

Im Vergleich zum Status Quo hat sich durch den höheren Energiebedarf die Anzahl an Ladestationen um 15 und die Anzahl der Ladesäulen um 88 erhöht, obwohl nur der Verkehrsfluss entlang einer Autobahn erhöht wurde. Alle anderen Verkehrsflüsse entlang den übrigen Autobahnen und Schnellstraßen blieben unverändert.

Die grafische Auswertung dieses Szenarios ist in Abbildung 11 zu sehen. Die farbliche Bedeutung wie auch die Kennzeichnung für die Anzahl der Ladesäulen wurde bewusst wie im Szenario „Status Quo“ gewählt, damit ein guter Vergleich angestellt werden kann. Damit ist deutlich erkennbar, dass die Rastpunkte entlang der Autobahn A2 deutlich ausgebaut und verstärkt werden müssten. Die maximale Anzahl der Ladesäulen für eine Ladestation beträgt in diesem Fall 12. Im Szenario „Status Quo“ lag diese nur bei 4.

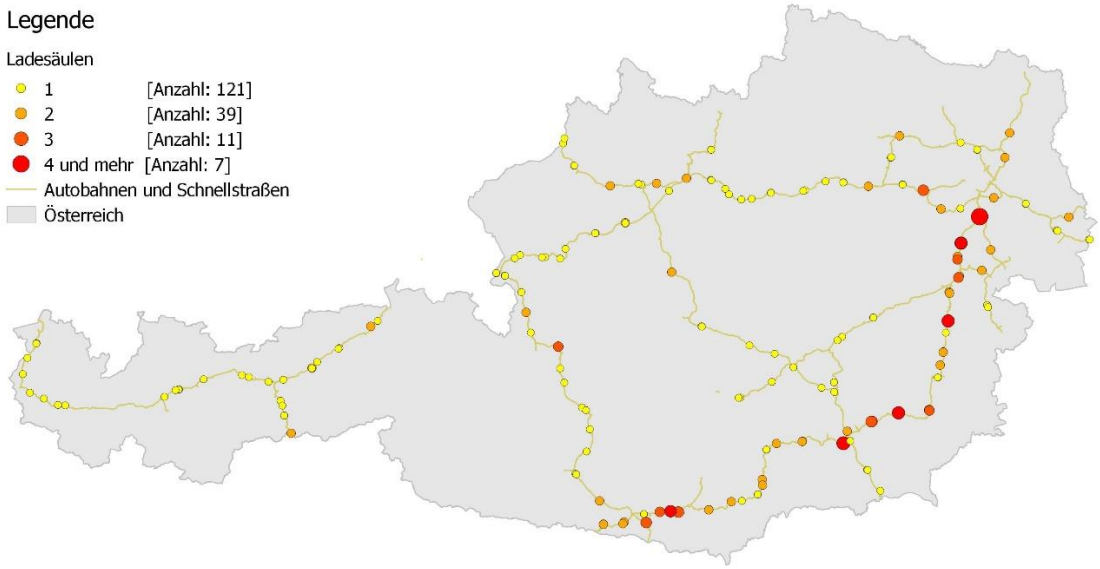

Abbildung 11: Optimale räumliche Verteilung der Ladestationen des Szenarios "Urlauberverkehr"

Sollte sich demnach solch ein Extremfall einstellen, wäre die ursprüngliche Ladeinfrastruktur dieser Situation nicht gewachsen und es würde zu einigen Engpässen kommen. Ein weiterer Punkt, der vom Ladestationenbetreiber für die zukünftige Planung und Errichtung von Ladestationen in Betracht gezogen werden sollte, damit die Ladeinfrastruktur solchen Extremsituationen stets gewappnet ist.

4.6. Auswirkungen der Elektrifizierung des Verkehrs

Als abschließender Punkt der Ergebnisse wird ein Vergleich zwischen dem Szenario „Status Quo“ aus Kapitel 4.1. und „Substitution des gesamten fossilen Personenverkehrs durch Elektro-Mobilität“ aus Kapitel 4.2. hinsichtlich der ökologischen und wirtschaftlichen Aspekte angestellt. Zum einen wird der gesamte Treibstoffverbrauch für den Status Quo (Kapitel 4.1.) berechnet, der sich durch die nahezu ausschließlich fossile Antriebsweise (ca. 99 %) ergibt. Zum anderen wird der gesamte elektrische Energieverbrauch für einen Anteil von 100 % an Elektrofahrzeugen (Kapitel 4.2.) berechnet. Dadurch kann auf die Treibhausgas-Emissionen geschlossen werden und das Einsparungspotential für einen rein elektrischen Betrieb des PKW-Fernverkehrs aufgezeigt werden. Von der wirtschaftlichen Seite sollen die anfallenden Steuern berechnet werden, die der Staat durch die fossilen Kraftstoffe und elektrische Energie

in den jeweiligen Fällen einnimmt. Diese Steuern werden anschließend miteinander verglichen, um zu beurteilen, wieviel Steuern durch die Elektrifizierung des Verkehrs in Zukunft fehlen könnten.

Als erste Grundlage für den Vergleich werden die Bestandszahlen[27] der Personenkraftwagen, sortiert nach Kraftstoffarten bzw. Energiequellen, in Österreich benötigt. Diese absoluten Zahlen und dessen relative Anteile sind in Tabelle 7 angeführt. Sonstige Kraftstoffarten bzw. Energiequellen neben Benzin, Diesel und Elektro (BEV) wurden hier nicht berücksichtigt, da diese kaum ins Gewicht fallen.

Der Treibstoffbedarf entlang den Autobahnen und Schnellstraßen in Österreich wird ähnlich wie der Energiebedarf für Elektrofahrzeuge (5) mit Hilfe von

$$e^{\text{Bedarf}} = \sum_i d_{i-1,i} \cdot f_i \cdot \Delta E \cdot \eta \tag{20}$$

berechnet, wobei in diesem Fall ΔE für den durchschnittlichen Treibstoffverbrauch[28], η für den relativen Anteil der mit Benzin und Diesel betriebenen Fahrzeuge und e^{Bedarf} für den gesamten Treibstoffbedarf in Litern steht.

Tabelle 7: Bestandszahlen der Personenkraftwagen in Österreich, sortiert nach Kraftstoffarten bzw. Energiequellen

	Absolute Anzahl	Relativer Anteil
Benzin	2.080.434	42,4%
Diesel	2.770.470	56,6%
Elektro (BEV)	14.618	0,3%
Sonstige	33.056	0,7%
Gesamt	4.898.578	100%

Des Weiteren wird der gesamte elektrische Energiebedarf für einen Elektrofahrzeuganteil von 100 %, wie es im Szenario 4.2. der Fall ist, durch (20) berechnet, wobei ΔE wieder für den spezifischen Energieverbrauch eines Elektrofahrzeugs (20 kWh pro 100 km) steht und der Parameter $\eta = 100\ \%$ beträgt. Die Ergebnisse für den gesamten Treibstoff- und elektrischen Energiebedarf sind in Tabelle 8 zu finden.

[27] vgl. https://www.bmvit.gv.at/verkehr/elektromobilitaet/downloads/oesterreich2017_de.pdf (abgerufen am 09.04.2018)
[28] vgl. https://www.vcoe.at/news/details/vcoe-realer-spritverbrauch-von-oesterreichs-autoflotte-sinkt-viel-zu-langsam (abgerufen am 09.04.2018)

Tabelle 8: Ergebnisse des Treibstoffbedarfs, der elektrischen Energiemenge und dessen CO_2-Äquivalent für den gesamten PKW-Fernverkehr in Österreich; Fossile Berechnung (Status Quo); Elektrische Berechnung (100% EV-Anteil)

	Bedarf pro Jahr	CO_2 Äquivalent pro Jahr
Gesamt Fossil	1931 Mio. Liter	5,678 Mio. Tonnen
Benzinanteil	869 Mio. Liter	2,397 Mio. Tonnen
Dieselanteil	1062 Mio. Liter	3,281 Mio. Tonnen
Elektrische Energie	5773 GWh	0,866 Mio. Tonnen
Einsparungen	-	**4,812 Mio. Tonnen**

Durch diese Bedarfsberechnungen kann zunächst die Gesamtmenge an Treibhausgas-Emissionen[29] (in CO_2-Äquivalent) und damit die Einsparungen an CO_2 einer kompletten elektrischen Antriebsweise gegenüber den fossilen Kraftstoffen berechnet werden. Für die Berechnung des CO_2-Äquivalents des gesamten elektrischen Energiebedarfs wird der österreichische Kraftwerkspark als Erzeuger herangezogen. Das bedeutet, dass ausschließlich österreichische Kraftwerksanlagen in die Berechnung der Treibhausgas-Emissionen einhergehen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden ebenfalls in Tabelle 8 präsentiert.

Damit lässt sich aus der Tabelle 8 entnehmen, dass eine komplette Elektrifizierung des PKW-Fernverkehrs ein Einsparungspotential von 4,812 Mio. Tonnen CO_2 mit sich bringen würde.

Um die elektrische Antriebsweise mit den fossilen Kraftstoffen wirtschaftlich zu vergleichen, werden zunächst die Umsätze der fossilen Kraftstoffe (Benzin und Diesel) berechnet. Dafür wird der zuvor berechnete Treibstoffbedarf und die durchschnittlichen Kraftstoffpreise[30] in Österreich (Stand: 09.04.2018) verwendet. Zu diesem Zeitpunkt lag der durchschnittliche Preis für Benzin (Eurosuper 95) bei 1,205 Euro pro Liter und für Dieselkraftstoff 1,154 Euro pro Liter. Für den Umsatz, der sich durch eine rein elektrische Antriebsweise ergeben würde, wird der Wert aus Tabelle 2 für $\eta = 100\ \%$ herangezogen. Dieser beträgt in diesem Fall 1,443 Mrd. €.

Um die entgangenen Steuern für den Staat zu berechnen, wird für die fossilen Kraftstoffe zum einen die Mineralölsteuer[31], die als Verbrauchssteuer für jeden Liter Benzin oder Diesel anfällt, und zum anderen die Umsatzsteuer berechnet, die zusammen die insgesamt anfallenden Steuern ergeben. Die Mineralölsteuer liegt für einen Liter Diesel bei 39,7 Cent und für einen Liter Benzin bei 48,2 Cent. Die Umsatzsteuer beträgt sowohl für die fossilen Kraftstoffe, als

[29] vgl. http://www5.umweltbundesamt.at/emas/co2mon/co2mon.html (abgerufen am 11.04.2018)
[30] vgl. https://www.wko.at/branchen/industrie/mineraloelindustrie/kraftstoffpreise.html (abgerufen am 11.04.2018)
[31] vgl. https://www.oeamtc.at/thema/verkehr/mineraloelsteuer-17914742 (abgerufen am 11.04.2018)

auch für die elektrische Energie 20 %. Im Falle der elektrischen Energie ergeben sich somit Gesamtsteuern bzw. Abgaben[32] (bestehend aus: Energieabgabe, Gebrauchsabgabe, Umsatzsteuer, Ökostromförderkosten, KWK-Pauschale) von rund 8,1 Cent pro kWh.

Die Ergebnisse für den jährlichen Umsatz und die eingenommenen Steuern des Staates für die beiden unterschiedlichen Szenarien werden in Tabelle 9 beschrieben.

Tabelle 9: Ergebnisse des Umsatzes und die Steuern pro Jahr für den gesamten PKW-Fernverkehr in Österreich; Fossile Berechnung (Status Quo); Elektrische Berechnung (100% EV-Anteil)

	Umsatz pro Jahr	Steuer pro Jahr
Gesamt Fossil	2,273 Mrd. Euro	1,219 Mrd. €
Benzinanteil	1,047 Mrd. Euro	593,4 Mio. €
Dieselanteil	1,226 Mrd. Euro	625,5 Mio. €
Elektrische Energie	1,443 Mrd. Euro	467,6 Mio. €
Differenz	**0,83 Mrd. €**	**751,4 Mio. €**

Unter den derzeitigen gesetzlichen Rahmenbedingungen würden dem Staat rund 751,4 Mio. € an Steuern entgehen, wenn der komplette PKW-Fernverkehr auf elektrische Antriebsweise umgestellt wird.

[32] vgl. https://www.e-control.at/konsumenten/strom/strompreis/preiszusammensetzung/steuern_und_abgaben (abgerufen am 11.04.2018)

5.Schlussfolgerungen

Wie aus den Ergebnissen des Kapitels 4 hervorgeht, konnte das Optimierungsmodell in dieser Form durchaus sehr plausible und aussagekräftige Lösungen liefern. Natürlich muss berücksichtigt werden, dass das Optimierungsmodell unter vielen Einschränkungen und idealen Bedingungen erstellt wurde, allerdings sind die wichtigsten Aussagen trotzdem deutlich zu erkennen.

Ein Vergleich der räumlichen Verteilung der Ladeinfrastruktur vom Szenario Status Quo mit dem bereits vorhandenen Ladenetz in Österreich durch die Firma Smatrics (siehe Kapitel 2.1.) macht deutlich, dass die Ladeinfrastruktur im Fernverkehrsnetz bereits auf dem besten Weg ist um den zukünftigen weiteren rasanten Zuwachs an Elektrofahrzeugen zu bewältigen. Die berechnete Verteilung von Ladestationen durch das Modell deckt sich sehr gut mit der aktuell vorhandenen Anzahl an Ladestationen, wobei auf den ersten Blick sogar ein Überangebot an Ladestationen herrscht.

Durch den zunehmenden Anteil an Elektrofahrzeugen, wie er im zweiten Szenario „Substitution des gesamten fossilen Personenverkehrs durch Elektromobilität“ vom Status Quo aus bis zu einem Anteil von 100 % gesteigert wurde, muss sich in Zukunft zum einen die Ladetechnologie und zum anderen die Batterietechnologie stark weiterentwickeln. Andernfalls wird es eine Herausforderung, diesen hohen Energiebedarf der Elektrofahrzeuge durch Ladestationen abzudecken. Das bedeutet, die Ladeleistungen müssen stets weiter wachsen um die Ladedauern zu verkürzen und die Batteriekapazitäten müssen ebenso weiter steigen um in den Reichweitenbereich eines konventionell betriebenen Kraftfahrzeugs zu kommen. Letzteres ist eher ein Grund um die Attraktivität für E-Mobilität weiter zu steigern um damit einen höheren Anteil an Elektrofahrzeugen im österreichischem Straßenverkehr zu erreichen.

Diese Entwicklung bringt auf der anderen Seite auch Herausforderungen mit sich. Zum Beispiel muss mit höheren Kosten der Ladestation als Produkt, aber auch mit höheren Installations- und Netzanschlusskosten gerechnet werden. Vor allem, wenn die Stromnetzinfrastruktur an einem Rastpunkt diesen hohen Anschlussleistungen nicht entspricht, sind die Kosten für den Ausbau enorm. Diese unterschiedlichen Anschlusskosten der Ladestationen, je nach vorhandener Stromnetzinfrastruktur, wurden in diesem Modell allerdings nicht

berücksichtigt. Ebenso ergeben sich über ganz Österreich verteilt unterschiedliche Parkplatz- bzw. Grundstückskosten, was ebenso nicht Teil dieser Arbeit war.

Eine weitere Herausforderung für die zukünftige Entwicklung der Ladeinfrastruktur stellen Extremfälle des Energiebedarfs, wie zum Beispiel im Szenario eines erhöhten Urlauberverkehrs gezeigt wurde, dar. Selbst in diesen Worst-Case-Szenarien muss die Ladeinfrastruktur stets den Energiebedarf decken können, da es sonst zu Engpässen kommen würde. Dieser Gedanke muss bei der Planung und Auslegung berücksichtigt werden.

Des Weiteren zeigt diese Diplomarbeit auch die Größenordnung des Umsatzes und Profits, mit dem der Ladestationenbetreiber bei einem Anteil von 100 % an Elektrofahrzeugen in Zukunft rechnen kann. Laut den Ergebnissen des Szenarios der Ladestrompreisentwicklung, das den Ladestrompreis als variable Größe beinhaltet, muss dieser zumindest bei 16 Cent pro kWh liegen, damit der Bau der berechneten Ladeinfrastruktur profitabel ist. Unter den gegebenen Annahmen dieses Szenarios kann mit einem Umsatz von bis zu 2,3 Mrd. € und einem Profit von bis zu 1,39 Mrd. € gerechnet werden. Zum Vergleich: Für den Status Quo ergibt sich ein Umsatz von 2,273 Mrd. € für die Tankstellenbetreiber (siehe Kapitel 4.6, Tabelle 9).

Der Wechsel von den fossilen Kraftstoffen zur elektrischen Antriebsweise bringt aber vor allem für den Staat eine große Herausforderung mit sich. Wie in Kapitel 4.6. berechnet, entgehen dem Staat in Zukunft ca. 751 Mio. € an Steuern. Dieses Defizit wird vor allem von der fehlenden Mineralölsteuer herrühren, wenn der komplette PKW-Fernverkehr elektrifiziert wird. Hinzu kommt noch ein weiterer sehr wichtiger Punkt in puncto Steuern, der in diesem Fall zahlenmäßig außer Acht gelassen wurde. Und zwar ist das die aktuell vorhandene motorbezogene Versicherungssteuer[33], die für jeden PKW mit Verbrennungsmotor, abhängig von der Leistung, gezahlt werden muss. Elektrofahrzeuge sind mit dem aktuellen Stand von dieser Steuer ausgenommen.

Für zukünftige Arbeiten können mehrere Ansätze im Modell detaillierter ausgeführt werden. Ein Ansatzpunkt wären zum Beispiel die Kosten für die Errichtung von Ladestationen. Dazu zählen neben den reinen Produktkosten beispielsweise die Grundstücks- oder Pachtkosten für den Parkplatz, die Installationskosten samt Markierungen, die Wartungskosten, die

[33] vgl. https://www.oeamtc.at/thema/steuern-abgaben/motorbezogene-versicherungssteuer-18178410 (abgerufen am 11.04.2018)

Netzanschlusskosten und der eventuell notwendige Ausbau des Stromversorgungsnetzes, wenn die Anschlussleistung zu groß für die vorhandene Stromnetzinfrastruktur wird.

Ein weiterer Punkt, der genauer behandelt werden könnte, ist die Auslastung der Ladestationen. Im Optimierungsmodell dieser Diplomarbeit wurde vereinfacht eine konstante Auslastung über den gesamten Tag angenommen, was wohl in der Praxis so nicht vorkommen würde. In der Nacht würde beispielsweise der Ladebedarf wesentlich geringer sein als unter Tags. Nachdem die Verkehrsflussdaten allerdings nur tageweise vorhanden waren und nicht stundenweise, könnte man in diesem Fall nur nach genaueren Daten bei der ASFINAG nachfragen. Anderenfalls müsste man sich eine eigene Modellierung für den Bedarf der Elektrofahrzeuge überlegen. Ebenso könnte man in diesem Zusammenhang die Methode der Warteschlangentheorie einbauen, um ein noch aussagekräftigeres Modell zu erhalten.

Weiters könnte das vorhandene Stromversorgungsnetz von Österreich in das Modell eingebunden werden, um die Anschluss- und Netzausbaukosten möglichst gering zu halten. Es ist zu vermuten, dass das derzeitige Stromversorgungsnetz für die hohen zukünftigen Anschlussleistungen der Ladestationen nicht ausgelegt sein wird und an den Rastpunkten mit sehr hohen Kosten ausgebaut werden muss. Eine Berücksichtigung solcher Kosten würde das Modell ebenso präziser machen.

Literaturverzeichnis

Aggeler, D., Canales, F., Zelaya, H., La Parra, D., Coccia, A., Butcher, N. and Apeldoorn, O. (2010) 'Ultra-fast DC-charge infrastructures for EV-mobility and future smart grids' in *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, IEEE, pp.1–8.

Asamer, J., Reinthaler, M., Ruthmair, M., Straub, M. and Puchinger, J. (2016) 'Optimizing charging station locations for urban taxi providers' in *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 85, pp.233–246.

Blahnik, V., Stepanek, J., Jara, M. and Talla, J. (2017) 'Ultra-fast charging station for public transport vehicles' in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, pp.6658–6662.

Capar, I. and Kuby, M. (2012) 'An efficient formulation of the flow refueling location model for alternative-fuel stations' in *IIE Transactions*, Vol. 44, No. 8, pp.622–636.

Catalbas, M.C., Yildirim, M., Gulten, A. and Kurum, H. (2017) 'Estimation of optimal locations for electric vehicle charging stations' in *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, IEEE, pp.1–4.

Gkatzoflias, D., Drossinos, Y., Zubaryeva, A., Zambelli, P., Dilara, P. and Thiel, C. (2016) *Optimal allocation of electric vehicle charging infrastructure in cities and regions,* Publications Office, Luxembourg.

Gopalakrishnan, R., Biswas, A., Lightwala, A., Vasudevan, S., Dutta, P. and Tripathi, A. (2016) 'Demand Prediction and Placement Optimization for Electric Vehicle Charging Stations', in *2016 Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, pp.3117–3123.

Guang, L. and Chengbi, Z. (2016) 'Location planning of charging station for electric vehicle based on urban traffic flow' in *2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, IEEE, pp.1–5.

Hagg, A., Spieker, H., Oslislo, A., Jacobs, V., Asteroth, A. and Meilinger, S. (2015) 'Methodische Grundlegung für eine Strategie zum sukzessiven Ausbau der Ladeinfrastruktur für Elektromobilität in Bonn und dem Rhein-Sieg-Kreis: Studie zur Strategie für den Ausbau der Ladeinfrastruktur im Hin-blick auf E-Autos und E-Zweiräder', pp.1–54.

Lam, A.Y.S., Leung, Y.-W. and Chu, X. (2014) 'Electric Vehicle Charging Station Placement: Formulation, Complexity, and Solutions' in *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 6, pp.2846–2856.

Lin, W. and Hua, G. (2015) 'The flow capturing location model and algorithm of electric vehicle charging stations' in *2015 International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS)*, IEEE, pp.1–6.

Lu, F. and Hua, G. (2015) 'A location-sizing model for electric vehicle charging station deployment based on queuing theory' in *2015 International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS)*, IEEE, pp.1–5.

Meyner F. (2012) 'Einführung in Netzwerk-Fluss-Probleme Das min-cut max-flow Theorem', in , *Seminar Innovative Internet-Technologien und Mobilkommunikation WS 11/12*, pp.33–38.

Tan, J. and Lin, W.-H. (2014) 'A stochastic flow capturing location and allocation model for siting electric vehicle charging stations' in *2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, pp.2811–2816.

Wang, S., Crosier, R. and Chu, Y. (2012) 'Investigating the power architectures and circuit topologies for megawatt superfast electric vehicle charging stations with enhanced grid support functionality' in *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, IEEE, pp.1–8.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Autobahn- und Schnellstraßennetz in Österreich 16
Abbildung 2: Verkehrsflussberechnung entlang der A1, Richtung Wien - Walserberg 18
Abbildung 3: Autobahnen, Schnellstraßen und Rastpunkte in Österreich 18
Abbildung 4: Energiebilanz für einen Knoten im Netzwerk 21
Abbildung 5: Optimale räumliche Verteilung der Ladestationen des Szenarios "Status Quo" 32
Abbildung 6: Linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl der Ladesäulen und dem EV-Anteil; Zusammenhang zwischen dem Profit pro Ladesäule pro Jahr und dem EV-Anteil 34
Abbildung 7: Optimale räumliche Verteilung der Ladestationen des Szenarios "Substitution des gesamten fossilen Personenverkehrs durch Elektromobilität“ 34
Abbildung 8: Hyperbolischer Zusammenhang zwischen der Anzahl der Ladesäulen bzw. ein linearer Zusammenhang zwischen dem Profit pro Ladesäule pro Jahr und der Anzahl an Fahrzeugen, die pro Ladesäule pro Tag vollgeladen werden können 36
Abbildung 9: Optimale räumliche Verteilung der Ladestationen des Szenarios "Technologische Entwicklung der Ladestationen und Elektrofahrzeuge" 38
Abbildung 10: Linearer Zusammenhang zwischen dem Ladestrompreis und dem Umsatz bzw. Profit für das Szenario „Ladestrompreisentwicklung“ 39
Abbildung 11: Optimale räumliche Verteilung der Ladestationen des Szenarios "Urlauberverkehr" 41

Anhang

5.1. Annahmen der Szenarien

In den folgenden Tabellen werden die Annahmen für die einzelnen Szenarien vollständigkeitshalber angeführt.

Tabelle 10: Annahmen der Parameter des Szenarios "Status Quo"

c_{fix}	50000 €
c_{var}	10000 €
c_{el}	0,25 €/kWh
c_{tax}	0,15 €/kWh
$\overline{E}^{\mathrm{EV}}$	20 kWh
η^{EV}	0,03 %
$\hat{f}$	20
k	∞
h	∞

Tabelle 11: Annahmen der Parameter des Szenarios "Substitution des gesamten fossilen Personenverkehrs durch Elektromobilität"

c_{fix}	50000 €
c_{var}	10000 €
c_{el}	0,25 €/kWh
c_{tax}	0,15 €/kWh
$\overline{E}^{\mathrm{EV}}$	20 kWh
η^{EV}	0,03 … 100 %
$\hat{f}$	20
k	∞
h	∞

Tabelle 12: Annahmen des Szenarios "Technologische Entwicklung der Ladestationen und Elektrofahrzeuge"

c_{fix}	50000 €
c_{var}	10000 €
c_{el}	0,25 €/kWh
c_{tax}	0,15 €/kWh
$\overline{E}^{\mathrm{EV}}$	20 - 100 kWh
η^{EV}	100 %
$\hat{f}$	20 - 288
k	∞
h	∞

Tabelle 13: Annahmen des Szenarios "Ladestrompreisentwicklung"

c_{fix}	50000 €
c_{var}	10000 €
c_{el}	0,1 … 0,4 €/kWh
c_{tax}	0,15 €/kWh
$\overline{E}^{\mathrm{EV}}$	20 kWh
η^{EV}	100 %
$\hat{f}$	20
k	∞
h	∞

Tabelle 14: Annahmen des Szenarios "Urlauberverkehr"

c_{fix}	50000 €
c_{var}	10000 €
c_{el}	0,25 €/kWh
c_{tax}	0,15 €/kWh
$\overline{E}^{\mathrm{EV}}$	20 kWh
η^{EV}	100 %
$\hat{f}$	20
k	∞
h	∞

Im Szenario „Urlauberverkehr“ wurde zusätzlich der Verkehrsfluss entlang der A2 um einen Faktor fünf erhöht.

5.2. Datensatz für das Optimierungsmodell

Die nachfolgende Tabelle trägt den Namen „Dir_0“ im Matlab-Modell und beinhaltet alle Daten der Rastpunkte in Richtung 0 (Normalrichtung) und 2 (beidseitig befahrbar).

ID	Autobahn	Name	Standort	Art	Richtung	Fluss	Energiebedarf
1	'A01'	'Steinhäusl'	32,7	0	2	35485,5	232075,4
2	'A01'	'Kirchstetten'	44,88	1	0	34900,0	85016,4
3	'A01'	'St. Pölten'	62,9	0	2	32433,6	116890,6
4	'A01'	'Roggendorf'	76,82	1	0	32256,6	89802,2
5	'A01'	'Ornding'	88,04	1	0	30279,0	67946,1
6	'A01'	'Kemmelbach'	101,38	0	0	29778,2	79448,3
7	'A01'	'Viehdorf'	118,17	1	0	28743,0	96518,8
8	'A01'	'Strengberg'	136,01	0	0	29403,6	104912,2
9	'A01'	'Ennsblick'	147,1	2	0	29708,0	65892,3
10	'A01'	'Enns Nord'	156,79	1	0	33848,3	65598,0
11	'A01'	'Ansfelden Nord'	171,01	0	0	50956,5	144920,4
12	'A01'	'Allhaming Nord'	182,6	1	0	23154,9	53673,0
13	'A01'	'Lindach Nord'	212,26	0	0	24719,7	146637,5
14	'A01'	'Hainbach Nord'	230,72	1	0	16696,6	61644,0
15	'A01'	'Wildenhag Nord'	243,76	2	0	18415,6	48028,0
16	'A01'	'Oberwang'	251,03	1	0	17666,7	25687,4
17	'A01'	'Mondsee'	259,23	0	2	17666,7	28973,5
18	'A01'	'Schafbergblick'	268,98	2	0	20637,0	40242,1
19	'A01'	'Enzersberg'	274,82	2	0	24120,0	28172,2
20	'A01'	'Salzburger Tor'	282,75	2	0	31497,8	49955,5
21	'A01'	'Kasern'	287,89	0	0	38738,1	39822,8
22	'A01'	'Walserberg Nord'	300,73	0	0	35000,0	89880,0
23	'A02'	'Guntramsdorf'	14,43	0	2	52598,2	151798,4
24	'A02'	'Triestingtal'	32,08	1	0	39374,6	138992,4
25	'A02'	'Bad Fischau'	40,93	0	0	35799,0	63364,3
26	'A02'	'Steinfeld'	50,35	1	0	30928,5	58269,4
27	'A02'	'Witzelsberg'	60,84	2	0	21809,0	45755,3
28	'A02'	'Zöbern'	78,76	0	2	19177,5	68732,0
29	'A02'	'Pinkafeld/West'	98	2	0	16285,0	62664,7
30	'A02'	'Loipersdorf'	105,5	0	2	15465,3	23198,0
31	'A02'	'St. Johann/Nord'	113,24	2	0	15496,1	23988,0
32	'A02'	'Hainersdorf'	133,87	1	0	16894,1	69705,2
33	'A02'	'Arnwiesen'	154,1	0	2	20052,7	81133,3
34	'A02'	'Laßnitzhöhe Nord'	170,16	1	0	27978,1	89865,7
35	'A02'	'Kaiserwald'	190,77	0	2	21735,9	89595,3
36	'A02'	'Herzogberg Nord'	220,13	1	0	9056,8	53181,7
37	'A02'	'Pack'	235,21	0	2	9056,8	27315,4
38	'A02'	'Twimberg Nord'	242,44	2	0	9725,2	14062,6
39	'A02'	'St. Ändra'	262,91	2	0	11102,2	45452,5
40	'A02'	'Gönitz/Nord'	268,89	2	0	11769,0	14075,7
41	'A02'	'Haimburg Nord'	279,17	2	0	11177,6	22981,1
42	'A02'	'Völkermarkt'	285,09	0	2	11177,6	13234,3
43	'A02'	'Grafenstein Nord'	300	1	0	12796,6	38159,5
44	'A02'	'Krumpendorf/Nord'	329,28	2	0	19323,8	113160,2
45	'A02'	'Wörthersee'	340,13	0	2	19346,4	41981,6

46	'A02'	'Sternberg/Nord'	349,03	2	0	18402,9	32757,2
47	'A02'	'Federaun/Nord'	361,73	2	0	16828,0	42743,2
48	'A02'	'Dreiländereck Süd'	374,17	0	2	8287,3	20618,7
49	'A02'	'Dreiländereck Nord'	374,27	0	2	7346,9	146,9
50	'A03'	'Hornstein'	28	0	2	18204,1	101943,0
51	'A04'	'Simmering'	2,45	0	0	43525,9	21327,7
52	'A04'	'Fischamend'	22,33	1	0	30845,4	122641,2
53	'A04'	'Göttlesbrunn'	28,04	0	2	30845,4	35225,4
54	'A04'	'Neusiedl'	47,01	2	0	22936,9	87022,7
55	'A04'	'Nickelsdorf Süd'	64,65	0	0	12000,0	42336,0
56	'A05'	'Hochleithen'	10,63	0	2	17911,1	38078,9
57	'A06'	'Potzneusiedl'	10,8	0	2	10794,7	23316,6
58	'A07'	'Denk'	25,76	1	0	19957,2	102819,3
59	'A08'	'Voralpenkreuz'	0,17	0	2	11405,9	387,8
60	'A08'	'Oberham/Nord'	18,32	2	0	26226,5	95202,1
61	'A08'	'Kematen/Nord'	24,85	2	0	21055,7	27498,7
62	'A08'	'Aistersheim'	33,81	0	2	19539,4	35014,7
63	'A08'	'Gotthaming'	43,74	2	0	17566,8	34887,7
64	'A08'	'Murau Ost'	56,88	1	0	17830,8	46859,4
65	'A08'	'Dietrichshofen/Ost'	72,06	2	0	15138,3	45959,9
66	'A09'	'Maisdorf/West'	12,73	2	0	10766,5	27411,5
67	'A09'	'St. Pankraz'	36,36	0	2	9088,3	42951,4
68	'A09'	'Pyhrn-Priel West'	55,04	1	0	7968,6	29770,7
69	'A09'	'Ardning West'	66,04	2	0	7526,8	16559,0
70	'A09'	'Rottenmann/Süd'	78,18	2	0	11271,6	27367,4
71	'A09'	'Trieben'	85,7	0	2	10848,7	16316,5
72	'A09'	'Treglwang'	94,03	2	0	10848,7	18073,9
73	'A09'	'Kalwang'	106,26	1	0	10938,5	26755,6
74	'A09'	'Kammern Süd'	121,26	0	2	11294,3	33883,0
75	'A09'	'St. Michael'	135,01	2	0	13232,9	36390,6
76	'A09'	'Hinterlainsach/Ost'	139,16	2	0	11151,5	9255,7
77	'A09'	'Kleintal'	150,57	2	0	11971,7	27319,4
78	'A09'	'Übelbach 2'	154,24	2	0	11971,7	8787,3
79	'A09'	'Deutschfeistritz'	161,95	0	2	11971,7	18460,4
80	'A09'	'Eggenfeld'	169,13	2	0	22115,1	31757,3
81	'A09'	'Premstätten'	192,48	1	0	29891,5	139593,3
82	'A09'	'Gralla West'	211,06	0	0	20457,8	76021,3
83	'A09'	'Straß West'	225,02	2	0	11166,0	31175,4
84	'A10'	'Glanegg/West'	4,28	2	0	79078,4	67691,1
85	'A10'	'Golling West'	28,82	0	0	47112,4	231227,9
86	'A10'	'Hohenwerfen'	40,34	2	0	35799,0	82481,0
87	'A10'	'Buchberg'	46,5	2	0	35799,0	44104,4
88	'A10'	'Eben Süd'	59,21	0	2	30928,5	78620,4
89	'A10'	'Eben Nord'	59,32	0	2	30928,5	680,4
90	'A10'	'Rohr'	71,25	2	0	21809,0	52036,3
91	'A10'	'Tauernalm'	79,79	0	2	19177,5	32755,1
92	'A10'	'Lungau'	97,91	0	0	16285,0	59016,9
93	'A10'	'Rennweg'	112,45	2	0	15465,3	44973,1
94	'A10'	'Eisentratten'	125,92	0	2	16584,5	44678,7
95	'A10'	'Wolfsberg'	142,25	2	0	18559,6	60615,7
96	'A10'	'Feistritz an der Drau'	162,01	0	2	24538,2	96975,0
97	'A11'	'Rosegg'	9,04	0	2	79388,1	143533,7
98	'A12'	'Angath Süd'	14,1	0	2	52708,4	148637,7

99	'A12'	'Angath Nord'	14,22	0	2	52636,7	1263,3
100	'A12'	'Münster Nord'	35,71	1	0	39374,6	169232,1
101	'A12'	'Weer'	54,8	0	0	30928,5	118085,2
102	'A12'	'Hall in Tirol'	66,28	2	0	21809,0	50073,5
103	'A12'	'Ampaß'	72,07	0	0	21809,0	25254,8
104	'A12'	'Kematen'	86,01	2	0	19177,5	53466,7
105	'A12'	'Zirl-Inzing'	91,77	1	0	16285,0	18760,3
106	'A12'	'Pettnau'	95,81	0	2	16285,0	13158,3
107	'A12'	'Telfs Nord'	103,33	2	0	15465,3	23259,8
108	'A12'	'Imst Nord'	133,84	2	0	16894,1	103087,9
109	'A12'	'Mils'	135,51	0	2	16894,1	5642,6
110	'A12'	'Kronburg Zams'	142,7	2	0	18559,6	26688,7
111	'A13'	'Berg Isel'	1,25	2	0	25838,7	6459,7
112	'A13'	'Patsch'	6,24	2	0	25838,7	25787,0
113	'A13'	'Europabrücke'	8,27	0	2	25838,7	10490,5
114	'A13'	'Matrei West'	16,79	0	0	20298,4	34588,5
115	'A13'	'Matrei Ost'	16,95	0	2	20298,4	649,5
116	'A13'	'Wipptalerhof West'	22,56	2	0	18324,9	20560,6
117	'A13'	'Nößlach West'	26,91	1	2	18298,1	15919,4
118	'A13'	'Gries West'	29,54	0	0	18184,6	9565,1
119	'A13'	'Brennersee - Fröhlich'	32,6	2	0	18184,6	11129,0
120	'A13'	'Brennersee'	33,44	0	0	18184,6	3055,0
121	'A13'	'Brennerpaß'	34,16	0	2	18184,6	2618,6
122	'A14'	'Dornbirn Ost'	15,27	2	0	26498,3	80925,7
123	'A14'	'Hohenems'	24,48	0	2	27950,2	51484,4
124	'A14'	'Rankweil West'	33,46	2	0	22493,7	40398,6
125	'A14'	'Schlins West'	46,72	2	0	13355,7	35419,2
126	'A21'	'Alland'	14,68	0	2	21084,0	61902,7
127	'A21'	'Hinterbrühl'	26,99	1	0	21466,1	52849,5
128	'A22'	'Korneuburg Ost'	18,12	0	0	31493,9	114134,0
129	'A25'	'Sinnersdorf/Nord'	5,97	2	0	27000,0	32238,0
130	'A25'	'Traunau/Nord'	9,69	2	0	27161,9	20208,4
131	'A25'	'Wels'	13,06	0	2	27060,0	18238,4
132	'S01'	'Schwechat'	9,85	0	2	35128,3	69202,8
133	'S01'	'Deutsch Wagram'	39,05	0	2	15600,9	91109,5
134	'S04'	'Pöttsching'	5,43	0	2	10314,1	11201,1
135	'S05'	'Zaina'	6,3	2	0	16321,8	20565,4
136	'S05'	'Grafenwörth'	32,85	0	2	12017,9	63815,2
137	'S06'	'Natschbach'	3,22	0	2	12977,3	8357,4
138	'S06'	'Gloggnitz Nord'	18,44	2	0	7830,9	23837,2
139	'S06'	'Schottwien'	23,57	0	2	7830,9	8034,5
140	'S06'	'Schwöbing Nord'	48,55	0	0	9208,4	46005,1
141	'S06'	'St. Marein'	68,99	0	0	11881,3	48570,8
142	'S16'	'Schnann'	18,9	0	2	5341,4	20190,5
143	'S16'	'Innerbraz'	54,99	0	0	6040,9	43603,4
144	'S16'	'Radin Nord'	59,03	2	0	6040,9	4881,1
145	'S31'	'Kobersdorf'	66,91	2	0	4911,6	65726,5
146	'S33'	'St. Pölten Ost'	1,84	0	0	15171,4	5583,1
147	'S33'	'Herzogenburg'	15,69	1	0	15601,6	43216,5
148	'S35'	'Fronleiten West'	26,82	2	0	10041,7	53863,7
149	'S36'	'St. Marein Nord'	14,89	0	0	9962,6	29668,7
150	'S36'	'Hauswald'	35,77	2	0	9884,9	41279,5

Die nachfolgende Tabelle trägt den Namen „Dir_1“ im Matlab-Modell und beinhaltet alle Daten der Rastpunkte in Richtung 1 (Inversrichtung) und 2 (beidseitig befahrbar).

ID	Autobahn	Name	Standort	Art	Richtung	Fluss	Energiebedarf
1	'A01'	'Steinhäusl'	32,7	0	2	33516,4	219197,0
2	'A01'	'Kesselhof'	44,88	1	1	33069,5	80557,2
3	'A01'	'St. Pölten'	62,9	0	2	31268,6	112692,0
4	'A01'	'Schallaburg'	76,81	1	1	30759,4	85572,7
5	'A01'	'Ybbs'	100,32	0	1	28623,6	134588,2
6	'A01'	'Amstetten'	119,36	1	1	27461,8	104574,6
7	'A01'	'Oed'	130,52	2	1	28409,8	63410,8
8	'A01'	'Haag'	143,54	0	1	28068,7	73090,8
9	'A01'	'Enns Süd'	156,19	1	1	31463,9	79603,7
10	'A01'	'Ansfelden Süd'	170,93	0	1	48152,0	141952,1
11	'A01'	'Allhaming Süd'	182,59	1	1	23679,1	55219,7
12	'A01'	'Lindach Süd'	212,27	0	1	24974,8	148250,5
13	'A01'	'Hainbach Süd'	230,7	1	1	18126,8	66815,5
14	'A01'	'Straß'	243,67	1	1	18482,3	47943,0
15	'A01'	'Mondsee'	259,23	0	2	17577,9	54702,4
16	'A01'	'Vetterbach'	270,63	2	1	20198,5	46052,6
17	'A01'	'Salzburger Vorland'	277,55	2	1	24172,0	33454,0
18	'A01'	'Söllheim'	286,46	0	1	31201,5	55601,0
19	'A01'	'Walserberg Süd'	300,71	0	1	22448,8	63979,1
20	'A02'	'Guntramsdorf'	14,43	0	2	52286,1	150897,7
21	'A02'	'Leobersdorf'	32,08	1	1	41904,8	147924,0
22	'A02'	'Föhrenberg'	39,31	0	1	41904,8	60594,4
23	'A02'	'Wr. Neustadt'	51,18	1	1	32210,7	76468,3
24	'A02'	'Gleissenfeld'	61,52	2	1	22784,3	47117,9
25	'A02'	'Zöbern'	78,76	0	2	19899,9	68615,0
26	'A02'	'Schäffern Ost'	86,7	1	1	19899,9	31601,1
27	'A02'	'Pinkafeld/Ost'	97,98	2	1	18238,9	41146,9
28	'A02'	'Loipersdorf'	105,5	0	2	16777,2	25232,9
29	'A02'	'St. Johann/Süd'	113,05	2	1	16777,3	25333,7
30	'A02'	'Bad Blumau'	134,06	1	1	18332,6	77033,5
31	'A02'	'Arnwiesen'	154,1	0	2	20369,5	81640,8
32	'A02'	'Laßnitzhöhe Süd'	170,65	1	1	30600,0	101286,0
33	'A02'	'Kaiserwald'	190,77	0	2	22840,5	91910,2
34	'A02'	'Herzogberg Süd'	220,19	1	1	9308,4	54770,8
35	'A02'	'Pack'	235,21	0	2	9308,4	27962,5
36	'A02'	'Twimberg Süd'	242,34	2	1	10828,0	15440,8
37	'A02'	'Fischering'	259,85	2	1	11825,6	41413,2
38	'A02'	'Gönitz/Süd'	268,86	2	1	12462,4	22457,2
39	'A02'	'Völkermarkt'	285,09	0	2	11509,8	37360,9
40	'A02'	'Grafenstein Süd'	300	1	1	14085,0	42001,4
41	'A02'	'Karawankenblick/Süd'	333,84	2	1	19951,9	135034,4
42	'A02'	'Wörthersee'	340,13	0	2	19619,1	24680,8
43	'A02'	'Sternberg/Süd'	349,01	2	1	19182,8	34068,6
44	'A02'	'Federaun/Süd'	362,78	2	1	16681,9	45942,0
45	'A02'	'Dreiländereck Süd'	374,17	0	2	10112,3	23035,7
46	'A02'	'Dreiländereck Nord'	374,27	0	2	9094,6	181,9
47	'A03'	'Hornstein'	28	0	2	18270,3	102313,5
48	'A04'	'Maria Ellend'	22,48	1	1	32397,0	145657,1
49	'A04'	'Göttlesbrunn'	28,04	0	2	32397,0	36025,5
50	'A04'	'Parndorf'	46,23	2	1	24533,5	89252,8

51	'A04'	'Nickelsdorf Nord'	64,97	0	1	13000,0	48724,0
52	'A05'	'Hochleithen'	10,63	0	2	17505,9	37217,6
53	'A06'	'Potzneusiedl'	10,8	0	2	10476,0	22628,1
54	'A07'	'Engerwitzdorf'	25,71	1	1	19668,0	101132,9
55	'A08'	'Voralpenkreuz'	0,17	0	2	10671,7	362,8
56	'A08'	'Oberham/Süd'	16,76	2	1	24268,0	80521,1
57	'A08'	'Schnittering/Süd'	20,68	2	1	18316,9	14360,5
58	'A08'	'Aistersheim'	33,81	0	2	17079,1	44849,6
59	'A08'	'Renhartsberg'	44,47	2	1	14652,4	31238,9
60	'A08'	'Murau West'	56,77	1	1	15380,1	37835,1
61	'A08'	'Suben West'	74,77	0	1	12508,9	45031,9
62	'A09'	'Maisdorf/Ost'	12,66	2	1	12209,9	30915,5
63	'A09'	'St. Pankraz'	36,36	0	2	11000,0	52140,0
64	'A09'	'Ardning Ost'	65,96	2	1	9076,7	53734,0
65	'A09'	'Rottenmann/Nord'	77,91	2	1	11788,4	28174,2
66	'A09'	'Trieben'	85,7	0	2	12223,7	19044,6
67	'A09'	'Gaishorn'	92,11	1	1	12223,7	15670,8
68	'A09'	'Kammern Nord'	121,18	2	1	12700,9	73842,8
69	'A09'	'Kammern Süd'	121,26	0	2	12700,9	203,2
70	'A09'	'Ortnerhof/West'	135,65	2	1	14001,2	40295,5
71	'A09'	'Hinterlainsach/West'	139,3	2	1	12622,3	9214,3
72	'A09'	'Übelbach 1'	154,16	2	1	13465,8	40020,3
73	'A09'	'Deutschfeistritz'	161,95	0	2	13465,8	20979,7
74	'A09'	'Feldkirchen'	186,97	2	1	29468,6	147461,0
75	'A09'	'Thalerhof'	196,52	2	1	25429,7	48570,7
76	'A09'	'Gralla Ost'	211,45	0	1	22788,5	68046,3
77	'A10'	'Untersberg/Ost'	4,37	2	1	76136,3	66543,1
78	'A10'	'Bruderloch'	17,53	2	1	52276,1	137590,6
79	'A10'	'Golling Ost'	28,76	0	1	47115,8	105822,1
80	'A10'	'Eben Süd'	59,21	0	2	32210,7	196163,3
81	'A10'	'Eben Nord'	59,32	0	2	32210,7	708,6
82	'A10'	'Tauernalm'	79,79	0	2	19899,9	81470,3
83	'A10'	'Lanschütz'	100,6	1	1	18238,9	75910,2
84	'A10'	'Eisentratten'	125,92	0	2	18529,2	93831,7
85	'A10'	'Seeboden'	141,72	2	1	20457,0	64644,1
86	'A10'	'Kamering'	154,29	2	1	20369,6	51209,1
87	'A10'	'Feistritz an der Drau'	162,01	0	2	25349,2	39139,1
88	'A11'	'St. Niklas/Nord'	2,11	2	1	76136,3	32129,5
89	'A11'	'Rosegg'	9,04	0	2	78038,9	108161,9
90	'A12'	'Langkampfen Süd'	9,32	2	1	77953,1	145304,6
91	'A12'	'Angath Süd'	14,1	0	2	52399,3	50093,7
92	'A12'	'Angath Nord'	14,22	0	2	52325,6	1255,8
93	'A12'	'Münster Süd'	36,25	1	1	41904,8	184632,7
94	'A12'	'Vomp'	50,47	0	1	32210,7	91607,3
95	'A12'	'Weer Süd'	55	1	1	32210,7	29182,9
96	'A12'	'Volders/Karlskirche'	64,18	2	1	22784,3	41831,9
97	'A12'	'Sieglanger'	80,39	2	1	19899,9	64515,6
98	'A12'	'Pettnau'	95,81	0	2	18238,9	56248,7
99	'A12'	'Telfs Süd'	103,3	2	1	16777,2	25132,2
100	'A12'	'Haiming Süd'	118,5	2	1	18529,2	56328,7
101	'A12'	'Imst Süd'	133,49	2	1	18332,6	54961,1
102	'A12'	'Mils'	135,51	0	2	18332,6	7406,4
103	'A13'	'Europabrücke'	8,27	0	2	28178,9	46607,9
104	'A13'	'Gschleirs'	14,05	2	1	22874,1	26442,4
105	'A13'	'Matrei Ost'	16,95	0	2	22874,1	13267,0

106	'A13'	'Wipptalerhof Ost'	22,41	2	1	18001,4	19657,5
107	'A13'	'Plon'	23,61	2	1	18001,4	4320,3
108	'A13'	'Nößlach West'	26,91	1	2	18246,2	12042,5
109	'A13'	'Nößlach Ost'	27,73	2	1	19242,8	3155,8
110	'A13'	'Gries Ost'	29,15	0	1	19283,1	5476,4
111	'A13'	'Brennerpaß'	34,16	0	2	19283,1	19321,7
112	'A14'	'Dornbirn West'	15,07	2	1	27252,2	82138,3
113	'A14'	'Hohenems'	24,48	0	2	28607,7	53839,6
114	'A14'	'Rankweil Ost'	33,82	2	1	21626,3	40397,8
115	'A14'	'Schlins Ost'	46,85	2	1	13785,9	35926,1
116	'A14'	'Nüziders'	55,2	2	1	13860,4	23146,8
117	'A21'	'Alland'	14,68	0	2	23077,6	67755,8
118	'A21'	'Dornbach'	19,96	2	1	23086,6	24379,5
119	'A21'	'Sparbach'	26,99	2	1	23869,6	33560,6
120	'A22'	'Korneuburg West'	18,04	0	1	31303,8	112944,0
121	'A22'	'Stockerau'	28,09	0	1	29258,4	58809,4
122	'A25'	'Sinnersdorf/Süd'	6,11	2	1	25000,0	30550,0
123	'A25'	'Wels'	13,06	0	2	25398,0	35303,2
124	'S01'	'Schwechat'	9,85	0	2	34184,9	67344,2
125	'S01'	'Deutsch Wagram'	39,05	0	2	15273,6	89197,8
126	'S04'	'Pöttsching'	5,43	0	2	10176,0	11051,1
127	'S05'	'Grafenwörth'	32,85	0	2	11991,5	78784,3
128	'S06'	'Natschbach'	3,22	0	2	13293,4	8560,9
129	'S06'	'Gloggnitz Süd'	17,81	2	1	7838,2	22871,9
130	'S06'	'Schottwien'	23,57	0	2	7838,2	9029,6
131	'S06'	'Schwöbing Süd'	48,57	0	1	9245,4	46226,9
132	'S06'	'Kapfenberg Süd'	72,45	0	1	12525,6	59822,4
133	'S16'	'Schnann'	18,9	0	2	5351,0	20226,9
134	'S16'	'Klösterle'	44,17	0	1	5086,4	25706,8
135	'S16'	'Radin Süd'	59,01	2	1	5564,8	16516,4
136	'S31'	'Tschurndorf'	68,14	2	1	4934,1	67241,8
137	'S33'	'Inzersdorf'	15,28	1	1	15166,9	46349,9
138	'S35'	'Fronleiten Ost'	26,82	2	1	9725,7	52168,8
139	'S36'	'St. Marein Süd'	14,97	0	1	10272,1	30754,6
140	'S36'	'Strettweg'	34,61	2	1	9887,4	38837,7

Abschließend ist nachfolgend noch der Kern des Matlab-Modells zu finden:

```
x = size(Dir_0,1);
y = size(Dir_1,1);

h = Inf;            %Unbegrenzte Anzahl an Ladestationen
k = Inf;            %Unbegrenzte Anzahl an Ladesäulen
g = 10000;          %Unbegrenzte Anzahl an Ladesäulen pro Ladestation
acc = 100;          %Durchschnittlich geladene Energiemenge in kWh
ec = 0.25;          %Endkundenpreis in €/kWh
e_tax = 0.15;       %Gesamtpreis für Steuern und Abgaben in €/kWh
cfix = 50000;       %Gesamtkosten einer Ladestation in €
cvar1 = 10000;      %Kosten einer Ladesäule in €
eta = 0.003;        %Anteil an Elektrofahrzeugen
cars = 20;          %Anzahl der ladenden Fahrzeuge pro Tag
count = 0;          %Doppelseitig befahrbare Stationen
energy = acc * cars;%Nebenbedingung (4)
e_average = (sum(Dir_0.Energiebedarf)+sum(Dir_1.Energiebedarf))*eta/(x+y);
                    %Nebenbedingung (9) und (10)
i= 0.05;            %Kalkulationszinssatz für RBF
T = 10;             %Berechnungszeitraum für RBF

RBF = 1/i-1/(i*(1+i)^T);    %Berechnung des RBF

zero_0 = zeros(x,1);
zero_1 = zeros(y,1);
ones_0 = ones(x,1);
ones_1 = ones(y,1);

%% Optionen
warning('off','YALMIP:strict')

Options = sdpsettings('solver', 'GUROBI', ...
    'verbose', 0, ...
    'warning', 0, ...
    'showprogress', 0);

%% Optimierungsproblem
% Definition der Optimierungsvariablen
pXi_Dir_0 = binvar(x,1,'full'); % Optimierungsvariable Xi, Richtung 0
pXi_Dir_1 = binvar(y,1,'full'); % Optimierungsvariable Xi, Richtung 1
pYi_Dir_0 = intvar(x,1,'full'); % Optimierungsvariable Yi, Richtung 0
pYi_Dir_1 = intvar(y,1,'full'); % Optimierungsvariable Yi, Richtung 1
pE_Zu_0 = sdpvar(x,1,'full');   % Optimierungsvariable E_Zu, Richtung 0
pE_Zu_1 = sdpvar(y,1,'full');   % Optimierungsvariable E_Zu, Richtung 1
pE_Ab_0 = sdpvar(x,1,'full');   % Optimierungsvariable E_Ab, Richtung 0
pE_Ab_1 = sdpvar(y,1,'full');   % Optimierungsvariable E_Ab, Richtung 1
pE_Laden_0 = sdpvar(x,1,'full');% Optimierungsvariable E_Laden, Richtung 0
pE_Laden_1 = sdpvar(y,1,'full');% Optimierungsvariable E_Laden, Richtung 1

% Definition der Bedingungen
Constraints = [];
```

```
% Bedingungen für Energie ZU am Anfang jeder Autobahn und Schnellstraße = 0
% Bedingungen für Energie AB am Ende jeder Autobahn und Schnellstraße = 0

% 4 Beispiele:

% Richtung 0, Anfang
Constraints = [Constraints, pE_Zu_0(1) == 0];
% Richtung 1, Anfang
Constraints = [Constraints, pE_Zu_1(1) == 0];
% Richtung 0, Ende
Constraints = [Constraints, pE_Ab_0(22) == 0];
% Richtung 1, Ende
Constraints = [Constraints, pE_Ab_1(19) == 0];

% Knotenregel Energie ZU = Energie AB
for i=2:x
    Constraints = [Constraints, pE_Zu_0(i) == pE_Ab_0(i-1)];
end

for i=2:y
    Constraints = [Constraints, pE_Zu_1(i) == pE_Ab_1(i-1)];
end

% Nullbedingungen
Constraints = [Constraints, pE_Laden_0 >= zero_0];
Constraints = [Constraints, pE_Laden_1 >= zero_1];
Constraints = [Constraints, pE_Zu_0 >= zero_0];
Constraints = [Constraints, pE_Zu_1 >= zero_1];
Constraints = [Constraints, pE_Ab_0 >= zero_0];
Constraints = [Constraints, pE_Ab_1 >= zero_1];

% Maximale TransitEnergie
Constraints = [Constraints, pE_Zu_0 <= (ones_0*e_average)];
Constraints = [Constraints, pE_Zu_1 <= (ones_1*e_average)];
Constraints = [Constraints, pE_Ab_0 <= (ones_0*e_average)];
Constraints = [Constraints, pE_Ab_1 <= (ones_1*e_average)];

% Knotenregel Energiebilanz in jedem Knoten
Constraints = [Constraints, pE_Laden_0 - Dir_0.Energiebedarf*eta - pE_Zu_0 +
pE_Ab_0 == 0];
Constraints = [Constraints, pE_Laden_1 - Dir_1.Energiebedarf*eta - pE_Zu_1 +
pE_Ab_1 == 0];

% Ladeabdeckung > Ladebedarf
Constraints = [Constraints, energy * pYi_Dir_0 >= pE_Laden_0];
Constraints = [Constraints, energy * pYi_Dir_1 >= pE_Laden_1];

% Ausbau von Rastpunkten mit Richtung == 2 bevorzugt
for i=1:x
        if Dir_0.Richtung(i) == 2 && (Dir_0.Energiebedarf(i)*eta > energy)
            name = Dir_0.Name(i);
            pos = find(ismember(Dir_1.Name,name));
            Constraints = [Constraints, pXi_Dir_0(i) == 1];
            Constraints = [Constraints, pYi_Dir_0(i) >= 1];
            Constraints = [Constraints, pXi_Dir_1(pos) == 1];
            Constraints = [Constraints, pYi_Dir_1(pos) >= 1];
            count = count + 1;
        end
 end
```

```
% Maximale Anzahl an Ladesäulen pro Ladestation
Constraints = [Constraints, pYi_Dir_0 <= pXi_Dir_0*g];
Constraints = [Constraints, pYi_Dir_1 <= pXi_Dir_1*g];

% Zielfunktion
obj = (sum(pE_Laden_0*(ec-e_tax))+sum(pE_Laden_1*(ec-e_tax))-
(1/RBF*1/365*((sum(pXi_Dir_0)+ sum(pXi_Dir_1)-count)*cfix +
(sum(pYi_Dir_0)+sum(pYi_Dir_1))*cvar1)));

% Start Optimierungsproblem
tic;
sol = optimize(Constraints, -obj, Options);
time2solve = toc;

%% Evaluation
% Umwandeln der Optimierungsvariablen in Zahlen
pXi_Dir_0 = value(pXi_Dir_0);
pXi_Dir_1 = value(pXi_Dir_1);
pYi_Dir_0 = value(pYi_Dir_0);
pYi_Dir_1 = value(pYi_Dir_1);

pE_Zu_0 = value(pE_Zu_0);
pE_Zu_1 = value(pE_Zu_1);
pE_Ab_0 = value(pE_Ab_0);
pE_Ab_1 = value(pE_Ab_1);
pE_Laden_0 = value(pE_Laden_0);
pE_Laden_1 = value(pE_Laden_1);

umsatz = (sum(pE_Laden_0*ec)+sum(pE_Laden_1*ec));

fprintf('Gesamter UMSATZ pro Jahr: %.0f € \n', umsatz*365);
fprintf('Gesamter PROFIT pro Jahr: %.0f €, Zeit: %f\n', value(obj)*365,
time2solve);
fprintf('Gesamter PROFIT pro Ladesäule: %.0f € \n',
value(obj)*365/(sum(pYi_Dir_0)+sum(pYi_Dir_1)));
```

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct – Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis (in der aktuellen Fassung des jeweiligen Mitteilungsblattes der TU Wien), insbesondere ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde bisher weder im In– noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

Wien, Datum

Unterschrift

Name