

**Integrierte Planung der Ladeinfrastruktur für
elektrifizierte Flotten kommunaler Unternehmen**

Masterarbeit

Felix Bastian Schuster

Matrikelnummer: 323840

Betreuer: Nicolas Dirks, M.Sc. RWTH

Laura Frank, M.Sc. RWTH

August 2018

Lehrstuhl für Operations Management

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

communicated by Univ.-Prof. Dr. rer. pol. Grit Walther

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	iii
II	Tabellenverzeichnis	v
III	Abbildungsverzeichnis	vi
IV	Formelzeichen und Abkürzungen.....	viii
1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Forschungsvorhaben und Aufbau.....	3
2	Literaturüberblick.....	5
2.1	Planungsmodelle für Fahrzeuge im kommunalen Einsatz	5
2.1.1	Tourenplanung für Pflegedienste	5
2.1.2	Tourenplanung für Busse im ÖPNV	6
2.1.3	Tourenplanung für Abfallsammelwagen.....	7
2.1.4	Anforderungen kommunaler Flotten an die Ladeinfrastrukturplanung.....	8
2.2	Modelle zur Ladeinfrastrukturplanung.....	8
2.2.1	Knotenbasierte Bedarfsaggregation.....	9
2.2.2	Flussbasierte Bedarfsaggregation.....	11
2.2.3	Simultane Routing- und Lokationsmodelle.....	16
2.2.4	Vergleich relevanter Modellierungsansätze	17
3	Modellformulierung	20
3.1	Bestimmung von Synergieeffekten	20
3.2	Annahmen für das Modell	21
3.3	Das DFRLM with Time-Windows and variable Battery Capacity	24
4	Datengenerierung	32
4.1	Preprocessing Pflegedienste	32
4.2	Preprocessing Busse im ÖPNV	37
4.3	Preprocessing Abfallsammelwagen.....	41
4.4	Generierung potentieller Standorte der Ladeinfrastruktur.....	46

I Inhaltsverzeichnis	IV
4.5 Generierung von Umwegen.....	48
5 Implementierung des Modells	49
5.1 Verwendete Parameter	49
5.2 Implementierung des DFRLM-TW-VBC	51
5.3 Sensitivitätsanalyse der verwendeten Parameter	53
6 Fazit und Ausblick.....	58
V Anhang	xi
V.1 Datengenerierung Pflegedienste	xi
V.2 Modell zur Tourenplanung für Pflegedienste.....	xvi
V.3 Datengenerierung Busse im ÖPNV	xx
V.4 Modell zur Tourenplanung für Busse im ÖPNV	xxiii
V.5 Datengenerierung Abfallsammelwagen	xxvi
V.6 Modell zur Tourenplanung für Abfallsammelwagen	xxvi
V.7 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	xxx
VI Literaturverzeichnis.....	xli
VII Eidesstattliche Versicherung	lii

II Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1.: Vergleich relevanter Modellierungsansätze	19
Tabelle 3.1: Notation des Modells	25
Tabelle 4.1: Sammelzeit und Entladezeit der Abfallsammelwagen	45
Tabelle 5.1: Parameter der Fahrzeuge	50
Tabelle 5.2: Parameter der Ladeinfrastruktur	51
Tabelle 5.3: Synergieeffekte der Ladeinfrastrukturplanung	52
Tabelle 5.4: Einfluss der Berücksichtigung von Umwegen	54
Tabelle V.1: Verteilung der OSM-Gebäudetypen	xi
Tabelle V.2: Ambulante Pflegedienste im Kreis Heinsberg	xii
Tabelle V.3: Notation des Modells zur Tourenplanung der Pflegedienste	xvi
Tabelle V.4: Standorte der Busdepots	xxi
Tabelle V.5: Notation des Modells zur Tourenplanung der Busse	xxiii
Tabelle V.6: Notation des Modells zur Tourenplanung der Abfallsammelwagen	xxvi
Tabelle V.7: Einfluss des verwendeten Cluster-Radius	xxx
Tabelle V.8: Einfluss variierender Fahrzeuganzahlen	xxxix
Tabelle V.9: Sensitivitätsanalyse sonstiger Parameter	xxxiii

III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit	4
Abbildung 3.1: Bestimmung von Synergieeffekten	21
Abbildung 3.2: Graph des Straßensystems.....	23
Abbildung 3.3: Graph des Fahrzeugs	23
Abbildung 4.1: Ablauf Preprocessing Pflegedienste.....	33
Abbildung 4.2: Clustering der Gebäude zu Patienten	35
Abbildung 4.3: Länge der täglichen Fahrstrecken von Pflegediensten.....	37
Abbildung 4.4: Ablauf Preprocessing Busse im ÖPNV.....	38
Abbildung 4.5: Beispielnetzgraph des Vehicle-Scheduling-Modells	40
Abbildung 4.6: Ablauf Preprocessing Abfallsammelwagen	42
Abbildung 4.7: Zuordnung einzelner Gebäude zu Clustern.....	44
Abbildung 4.8: Ablauf der Generierung potentieller Ladeinfrastrukturstandorte.....	46
Abbildung 4.9: Beispiel Generierung eines potentiellen Ladeinfrastrukturstandorts	47
Abbildung 4.10: Ablauf der Generierung von Umwegen	48
Abbildung 5.1: Synergieeffekte der Ladeinfrastrukturplanung.....	53
Abbildung 5.2: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Cluster-Radien.....	55
Abbildung 5.3: Untersuchung des Einflusses variierender Fahrzeuganzahlen	56
Abbildung V.1: Pflegestationen und Patienten im Kreis Heinsberg	xv
Abbildung V.2: Ergebnis der Tourenplanung für Pflegedienste	xvi
Abbildung V.3: Fahrrouten der Westverkehr GmbH.....	xxi
Abbildung V.4: Fahrrouten der Busverkehr Rheinland GmbH.....	xxii

Abbildung V.5: Abfallcluster im Kreis Heinsberg.....	xxvi
Abbildung V.6: Graph der Vergleichsmodellinstanz	xxx i
Abbildung V.7: Einfluss variierender Fahrzeuganzahlen	xxxii
Abbildung V.8: Auswertung der Sensitivitätsanalyse.....	xl

IV Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
AC-PC	Arc-Cover / Path-Cover-Formulierung
AVV	Aachener Verkehrsverbund
BEV	Battery Electric Vehicle
BWS	Batteriewechselstation
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CDFRLP	Capacitated-DFRLP
CFRLM	Capacitated-Flow-Refueling-Location-Model
CVRP-TW	Capacitated-VRP-TW
DBSCAN	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
DFRLM	Deviation-Flow-Refueling-Location-Model
DFRLM-TW-VBC	DFRLM with Time-Windows and variable Battery Capacity
ELRP	Electric-(Vehicle-)Location-Routing-Problem
ELRP-TWPR	ELRP with Time Windows and partial Recharging
engl.	englisch
et al.	et alii / et aliae

EU	Europäische Union
EVRP	Electric-Vehicle-Routing-Problem
FCLM	Flow-Capturing-Location-Model
FCLP	Fixed-Charge-Location-Problem
FILM	Flow-Capturing-Intercepting-Location-Model
FRLP	Flow-Refueling-Location-Problem
FRLP-LFC	FRLP with Load-Flow-Control
FSCLM	Flowbased-Set-Covering-Location-Model
HCWSRP	Home-Care-Worker-Scheduling and Routing Problem
LSCP	Location-Set-Covering-Problem
MCLP	Maximum-Covering-Location-Problem
MDPVRP-IF	Multi-Depot-Periodic-Vehicle-Routing-Problem with Intermediate Facilities
MD-VRP	Multi-Depot-Vehicle-Routing-Problem
MDVSP	Multiple-Depot-Vehicle-Scheduling-Problem
MFRLP	Multi-Period-FRLP
OD-Matrix	Origin-Destination-Matrix
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OSM	Open Street Map
OSRM	Open Source Routing Maschine

pCP	p-Center-Problem
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
pMP	p-Median-Problem
s.	siehe
vgl.	vergleiche
VRP-TW	Vehicle-Routing-Problem with Time-Windows

1 Einleitung

1.1 Motivation

Laut Schätzungen des Bundesumweltamtes wurden im Zeitraum von 2007 bis 2015 im Mittel jährlich etwa 44.900 vorzeitige Todesfälle durch Feinstaub verursacht.¹ Die Zahlen für Todesfälle durch Stickoxide sind ähnlich besorgniserregend. Die Europäische Umweltagentur beziffert die im Jahr 2012 durch Stickoxide verursachte Anzahl an Todesfällen auf 10.400. Weiterhin können Stickoxide auch Pflanzen schädigen und zur Überdüngung und Versauerung von Böden beitragen.²

Deshalb wurden bereits 2008 mit der Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG verbindliche Grenzwerte für Stickoxide, Feinstaub und Kohlenmonoxid für die Mitgliedsstaaten der EU festgelegt.³ Die darauf folgende Einrichtung von Umweltzonen sollte einen Beitrag dazu leisten, diese Grenzwerte in den besonders belasteten Innenstädten einzuhalten.⁴ Laut EU-Kommission konnte durch die Einführung von Umweltzonen eine Reduktion von Luftschadstoffen in Innenstädten erzielt und die Luftqualität gesteigert werden. Weiterhin wird angegeben, dass die Einführung von Umweltzonen nur eine von vielen Maßnahmen darstellt, um die Luftqualität in Innenstädten zu verbessern.⁵ Jüngste Vertragsverletzungsverfahren der EU-Kommission gegen Deutschland und fünf andere EU-Mitgliedsstaaten wegen der Überschreitung der Grenzwerte gesundheitsschädlicher Schadstoffe in der Luft zeigen, dass weiterhin Handlungsbedarf in der Verbesserung der Luftqualität besteht.⁶

Gemäß einer Untersuchung des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2015 sind 70 % des Kohlenmonoxid-Ausstoßes und 60 % der Stickoxide auf den Straßenverkehr zurückzuführen.⁷ In Innenstädten werden sogar bis zu 80 % der Stickoxide von Fahrzeugen ausgestoßen.⁸ Elektrisch betriebene Fahrzeuge, genauer Battery Electric Vehicle (BEV) und Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV), können lokal emissionsfrei betrieben werden und stellen somit einen möglichen Lösungsansatz dar, um den Ausstoß von Abgasen in Innenstädten zu reduzieren. Weiterhin

¹ Umweltbundesamt (Hg.) 2017, Gesundheitsrisiken der Bevölkerung

² Zeit Online (Hg.) 25.04.2017, Welche Folgen Stickoxide haben

³ Umweltbundesamt (Hg.) 2014, Luftreinhaltung in der EU

⁴ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.), Umweltzonen

⁵ Schlesinger, Auswirkungen von Umweltzonen

⁶ Zeit Online (Hg.) 17.05.2018, Luftverschmutzung: EU-Kommission verklagt Deutschland

⁷ Bundeszentrale für politische Bildung (Hg.) 30.03.2009, Luftverschmutzung durch Industrie

⁸ Südwestrundfunk (Hg.) 28.11.2007, Luftschadstoffe: Stickoxide

kann durch Elektromobilität die Lärmemission des Verkehrs reduziert werden und dadurch die Lebensqualität in Städten merklich verbessert werden.⁹

Kommunale Unternehmen, insbesondere Unternehmen des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV), Pflegedienste und Ver- und Entsorgungsdienstleister sind Betreiber einer der größten kommerziellen Flotten im städtischen Umfeld.¹⁰ Dadurch kommt ihnen bei der Einhaltung von Emissionsgrenzwerten eine besondere Verantwortung zu. Durch einen verstärkten Einsatz von elektrisch betriebenen Fahrzeugen können Kommunen nicht nur dieser Verantwortung gerecht werden, sondern auch eine Vorbild- und Vorreiterrolle für nachhaltige Mobilität einnehmen.¹¹ Insbesondere birgt der Einsatz von elektrischen Antrieben in Fahrzeugen, wie Busse und Abfallsammelwagen, welche in einem stark frequentierten Stop-and-Go Betrieb verkehren, ein großes Einsparpotential von Energie und Emissionen.¹² Diesen Vorteilen stehen Mehrkosten bei der Beschaffung entgegen, welche Kommunen, die haushaltsrechtlich an das Gebot der Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit gebunden sind, zögern lassen.¹³ Diese Mehrkosten amortisieren sich allerdings über die Laufzeit der Fahrzeuge aufgrund von geringeren Betriebs- und Wartungskosten.¹⁴

Ein weiteres Hemmnis bei der Elektrifizierung des kommunalen Straßenverkehrs stellt der unzureichende und kostenintensive Ausbau der Ladeinfrastruktur dar.¹⁵ Die Ladeinfrastruktur ist von besonderer Bedeutung, da eine Abdeckung der täglich gefahren Strecke für Busse und Fahrzeuge der Abfallentsorgung mit der heutigen Batterietechnologie technisch sowie wirtschaftlich nur eingeschränkt realisierbar ist.¹⁶ Neben Förderung durch den Bund kann durch die Nutzung von Synergieeffekten in der Planung der Ladeinfrastruktur für die heterogenen Flotten der kommunalen Unternehmen eine höhere Wirtschaftlichkeit erzielt werden. Der Bedarf und die Aktualität, die Planung der Ladeinfrastruktur für kommunale Unternehmen auf einer wissenschaftlichen Basis zu untersuchen, zeigen sich auch in den derzeitigen Artikeln von Fachzeitschriften. So veröffentlicht die Zeitung für kommunale Wirtschaft in ihrer Ausgabe von Mai

⁹ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.), Kommunale Flotte

¹⁰ Handschuh et al. November 2017, Elektromobilität bei kommunalen Nutzfahrzeugen

¹¹ Deutscher Städte- und Gemeindebund (Hg.) 24.05.2017, Elektromobilität - Tipps für Kommunen

¹² ElektroMobilität NRW (Hg.) Juli 2016, Elektromobilität kurz erklärt

¹³ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.), Kommunale Flotte

¹⁴ Deutscher Städte- und Gemeindebund (Hg.) 24.05.2017, Elektromobilität - Tipps für Kommunen

¹⁵ apm³ GmbH (Hg.) 13.04.2016, Fuhrpark und Mobilität - Elektroautos

¹⁶ Deutscher Städte- und Gemeindebund (Hg.) 24.05.2017, Elektromobilität - Tipps für Kommunen

2018 einen Artikel mit dem Titel: „Die Gretchenfrage der Ladestrategie – Elektrobusse: Reicht eine Station im Depot oder muss an der Strecke nachgeladen werden?“.¹⁷

1.2 Forschungsvorhaben und Aufbau

Es existieren bereits Standortplanungsmodelle zur Ladeinfrastrukturplanung (vgl. Kuby u. Lim (2005)¹⁸; Kim u. Kuby (2012)¹⁹; Schiffer u. Walther (2017)²⁰). Ein Standortplanungsmodell für Ladeinfrastruktur, welches die speziellen Anforderungen von Fahrzeugen im kommunalen Einsatz berücksichtigt und gleichzeitig das Potenzial der synergetischen Planung bestimmt, wurde in der bisherigen Forschung nicht aufgegriffen. Deshalb wird in dieser Arbeit ein Beitrag dazu geleistet, dieses Forschungsdefizit an Hand von zwei Forschungsfragen zu verringern:

Forschungsfrage 1:

Wie kann für eine heterogene Flotte, wie sie für kommunale Unternehmen typisch ist, unter Berücksichtigung von eng getakteten Zeitplänen und unterschiedlichen Batteriekapazitäten auf Basis wirtschaftlicher Betrachtungen Ladeinfrastruktur geplant werden?

Forschungsfrage 2:

Lassen sich durch eine gemeinschaftliche Planung der Ladeinfrastruktur für unterschiedliche kommunale Unternehmen Synergieeffekte erreichen?

In Abbildung 1.1 wird der Aufbau dieser Arbeit dargestellt. Zunächst werden in Abschnitt 2.1 mit den Fahrzeugen von Pflegediensten, Bussen im öffentlichen Personennahverkehr und Abfallsammelwagen die wichtigsten Flotten kommunaler Unternehmen identifiziert. Für diese werden die flottentypischen Einsatzabläufe beschrieben und ein Überblick über die in der Literatur verwendeten Ansätze zur Tourenplanung gegeben. Aus den Einsatzabläufen und den Ansätzen zur Tourenplanung werden abschließend Anforderungen an die Ladeinfrastrukturplanung für Fahrzeuge von Pflegediensten, Busse und Abfallsammelwagen abgeleitet. In Abschnitt 2.2 wird der Stand der Forschung von Standortplanungsmodellen zur Planung von Ladeinfrastruktur abgegrenzt. Abschließend wird die Eignung der vorgestellten Standortplanungsmodelle zur Ladeinfrastrukturplanung für die Flotten von kommunalen Unternehmen und zur Bestimmung von Synergieeffekten diskutiert. Kapitel 3 beinhaltet die Formulierung des, in dieser Arbeit entwickelten, Modells zur Ladeinfrastrukturplanung für kommunale Flotten. Dieses Deviation-Flow-Refueling-Location-Model with Time-Windows and variable Battery Capacity (DFRLM-

¹⁷ Leßner Mai 2018, Die Gretchenfrage der Ladestrategie, S. 20

¹⁸ Kuby und Lim 2005, The flow-refueling location problem

¹⁹ Kim und Kuby 2012, The deviation-flow refueling location model

²⁰ Schiffer und Walther 2017, The electric location routing problem

TW-VBC) berücksichtigt sowohl die Möglichkeit Umwege zum Erreichen einer Ladestation zu fahren, als auch die Einhaltung von Fahrplänen, variable Batteriekapazitäten und die Möglichkeit des Batterietauschs an sogenannten Batteriewechselstationen (BWS). Anschließend wird die Verwendbarkeit des DFRLM-TW-VBC zur Ladeinfrastrukturplanung für die kommunalen Flotten im Kreis Heinsberg überprüft. Weiterhin wird die Eignung des Modells zur Bestimmung von Synergieeffekten bei der gemeinschaftlichen Planung der Ladeinfrastruktur im realen Anwendungsfall validiert. Dazu werden in Kapitel 4 die zur Implementierung des Modells notwendigen Fahrzeugrouten und Fahrzeiten generiert. In Kapitel 5 wird das Modell unter Verwendung der generierten Daten implementiert und die Ergebnisse der Ladeinfrastrukturplanung analysiert. Insbesondere werden Synergieeffekte bei der gemeinschaftlichen Planung der Ladeinfrastruktur für Busse im ÖPNV und Abfallsammelwagen bestimmt. Darüber hinaus wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss der verwendeten Parameter auf die Höhe der Synergieeffekte zu untersuchen. Die vorliegende Arbeit wird in Kapitel 6 mit einer kritischen Würdigung und einem Ausblick über den zukünftigen Forschungsbedarf auf dem Gebiet der Ladeinfrastrukturplanung für die Flotten kommunaler Unternehmen abgeschlossen.

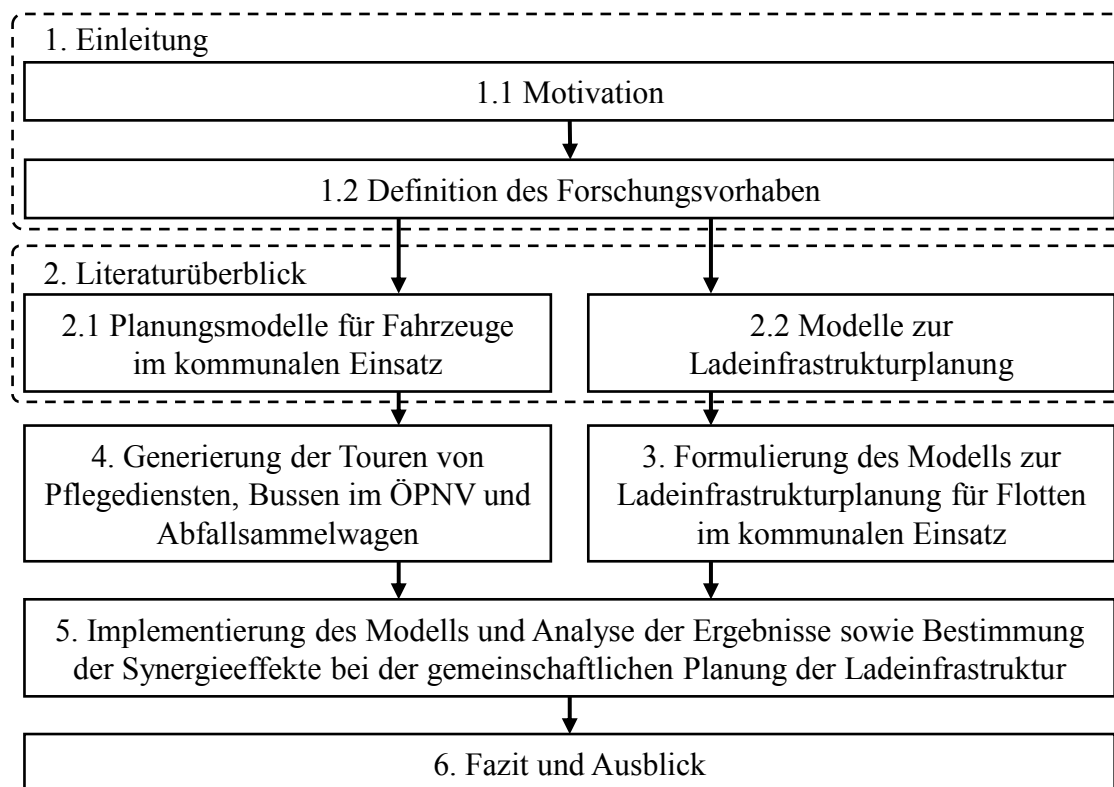


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit

2 Literaturüberblick

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden die wichtigsten Flotten im kommunalen Einsatz identifiziert. Für diese werden die flottentypischen Einsatzabläufe beschrieben und die in der Literatur verwendeten Ansätze zur Tourenplanung zusammengefasst. Aus den Einsatzabläufen und den Ansätzen zur Tourenplanung werden Anforderungen an die Ladeinfrastrukturplanung abgeleitet. Im zweiten Abschnitt wird ein Überblick über den Stand der Forschung von Standortplanungsmodellen zur Planung von Ladeinfrastruktur gegeben. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion der Eignung der vorgestellten Standortplanungsmodelle zur Ladeinfrastrukturplanung für die Flotten von kommunalen Unternehmen und zur Bestimmung von Synergieeffekten ab.

2.1 Planungsmodelle für Fahrzeuge im kommunalen Einsatz

Die Ausführung öffentlicher Aufgaben erfordert je nach Betätigungsgebiet einen unterschiedlich großen Fuhrpark in den kommunalen Unternehmen. Pflegedienste stellen mit 86.000 Fahrzeugen die größte Flotte kommunaler Fahrzeuge in Deutschland.²¹ Die zweitgrößte Flotte im kommunalen Einsatz in Deutschland sind Busse im ÖPNV mit etwa 36.600 Fahrzeugen.²² Weiterhin befinden sich in Deutschland ca. 12.000 Abfallsammelfahrzeuge²³ und etwa 8.250 Kehrmaschinen²⁴ im Einsatz. Wird vernachlässigt, dass die Auslastung der einzelnen Fahrzeugflotten unterschiedlich hoch ist, so kann vereinfacht davon ausgegangen werden, dass größere Fahrzeugflotten auch ein größeres Potential für eine Elektrifizierung darstellen. Deshalb wird im Nachfolgenden die Betrachtung der Tourenplanung auf Pflegedienste, Busse im ÖPNV und Abfallsammelwagen beschränkt.

2.1.1 Tourenplanung für Pflegedienste

Die Tourenplanung für die Fahrzeuge von Pflegediensten ist sehr dynamisch und unterliegt täglichen Anpassungen aufgrund von Absagen, Abwesenheit der Patienten oder Krankheitsfällen von Mitarbeitern im operativen Betrieb.²⁵ Die Planung erfolgt in einer kombinierten Touren- und Personal-Einsatzplanung.²⁶ Jede Tour startet auf dem jeweiligen Firmengelände des

²¹ Nieß 27.04.2016, Pflegedienste: Wo sich E-Autos lohnen

²² Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (Hg.) 2015, Statistik, S. 31

²³ Verband der Arbeitsgeräte- und (Hg.), AG Abfallsammelfahrzeuge

²⁴ tagesschau.de (Hg.) 12.04.2018, Zahl der Einwohner Deutschlands; Gesellschaft für Abfallwirtschaft und Stadtreinigung mbH (Hg.) 2017, Beitrag des kommunalen Fuhrparks

²⁵ Vincentz Network GmbH & Co. KG (Hg.) 22.09.2014, Wie Pflegedienste Touren ergebnisorientiert planen

²⁶ Hermann 2014, Die Kombinierte Touren- und Personal-Einsatzplanung, S. 4

Pflegediensts und endet auch dort, da sich mehrere Mitarbeiter aus Früh- und Spätschicht ein Fahrzeug teilen.²⁷

Erste Ansätze die Tourenplanung und Terminplanung von häuslichen Pflegediensten auf Basis eines Vehicle-Routing-Problems with Time-Windows (VRP-TW) zu formulieren, gehen auf Cheng u. Rich (1998) zurück.²⁸ Bertels u. Fahle (2006) ergänzen das VRP-TW um Aspekte der zwischenmenschlichen Interaktion und der Ergonomie zum Home-Care-Worker-Scheduling and Routing Problem (HCWSRP). Ziel des Modells ist es bei maximaler Kunden- und Mitarbeiterzufriedenheit die Kosten zu minimieren.²⁹ Eine weitere Ergänzung des HCWSRP um eine Betrachtung der notwendigen Pausenzeiten und der Ermüdung der Mitarbeiter entwickeln Liu et al. (2017).³⁰ Fikar u. Hirsch (2017) stellen in ihrer Arbeit einen umfassenden Überblick bisheriger Publikationen auf dem Forschungsgebiet des Health Care Routing und Scheduling zusammen.³¹ Eine Betrachtung der spezifischen Charakteristika von BEVs im Einsatz von häuslichen Pflegediensten existiert bis dato noch nicht.

2.1.2 Tourenplanung für Busse im ÖPNV

Bei der Tourenplanung von Bussen im ÖPNV müssen ein schwankender Transportbedarf, Länge der Pausen und der Arbeitszeiten sowie technische Bedingungen, wie Wartungsintervalle, berücksichtigt werden.³² Aufgrund dieser hohen Komplexität muss die operative Planung unterteilt nach Linienplanung, Fahrplanerstellung, Umlaufaufplanung und Tagesdienstplanung nach dem Prinzip der hierarchischen Planung sequentiell erfolgen.³³ Jede Tour eines Busses startet und endet in einem Depot. Dabei ist nicht zwangsweise gegeben, dass das Start-Depot dem End-Depot entspricht. Des Weiteren besteht die als Umlauf bezeichnete tägliche Fahrtstrecke aus Fahrgastfahrten und aus Leerfahrten, welche ohne die Beförderung von Fahrgästen erfolgen.³⁴

²⁷ Bertels et al. 2003, Partizipative Personaleinsatzplanung

²⁸ Cheng und Rich 1998, A Home Health Care Problem

²⁹ Bertels und Fahle 2006, A hybrid setup

³⁰ Liu et al. 2017, Mathematical model

³¹ Fikar und Hirsch 2017, Home health care routing

³² Kliewer 2005, Optimierung des Fahrzeugeinsatzes, S. 9

³³ Borndörfer, Neumann und Pfetsch 2008, Angebotsplanung im öffentlichen Nahverkehr, S. 1

³⁴ Becker 2006, Umlaufplanung für den ÖV, S. 3

Bokinge u. Hasselström (1980) formulieren die Tourenplanung von Bussen im ÖPNV als Minimal-Cost-Flow Problem, welches bei einer festen Anzahl an vorgegebenen Touren die Anzahl der Fahrzeuge minimiert.³⁵ Kliewer (2005) optimiert die Umlaufplanung mit einem Multiple-Depot-Vehicle-Scheduling-Problem (MDVSP) und berücksichtigt dabei, dass ein Bus nicht zum Start-Depot der Tour zurückkehren muss.³⁶ Durch Vereinfachung des sequentiellen Planungsprozesses von Linienplanung, Fahrplanerstellung und Umlaufplanung kann Schöbel (2017) eine integrierende Betrachtung aller Planungsschritte mithilfe einer Heuristik lösen.³⁷

Barco et al. (2017) modellieren den Einsatz von Elektrobussen im Shuttleservice auf Basis eines Electric-Vehicle-Routing-Problems (EVRP) unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs, der Ladedauer und der Battericalterung.³⁸ Unter Verwendung eines Transit-Network-Design-Problems untersuchen Beltran et al. (2009) den Einsatz von elektrischen Bussen in gemischten Flotten.³⁹ Wissenschaftliche Arbeiten, welche die Tourenplanung elektrisch betriebener Busse mit der Planung von Ladeinfrastruktur kombinieren, existieren noch nicht.

2.1.3 Tourenplanung für Abfallsammelwagen

Der tägliche Arbeitsablauf eines Abfallsammelfahrzeugs setzt sich, neben dem eigentlichen Einsammeln des Abfalls, aus mehreren Arbeitsschritten zusammen. Morgendlich wird das Fahrzeug für den Einsatz gerüstet und fährt zum Einsatzgebiet. Anschließend wird der Abfall eingesammelt. Zum Entladen des vollgeladenen Fahrzeugs müssen teilweise weite Transportfahrten unternommen werden. Während der Mittagspause steht das Fahrzeug für eine halbe Stunde. Je nach Ladekapazität und Entfernung der Abladestelle werden mehrere Fahrten täglich unternommen. Zusätzlich gibt es Serviceteams, welche die Mülltonnen bereits vor dem Eintreffen des Abfallsammelwagens bereitstellen. Dieser Vollservice wird jedoch nicht von allen Kommunen angeboten. Da die Serviceteams nahezu autark arbeiten, müssen diese bei der Tourenplanung der Abfallsammelwagen nicht berücksichtigt werden.⁴⁰

Edinger (2011) stellt mit dem Multi-Depot-Periodic-Vehicle-Routing-Problem with Intermediate Facilities (MDPVRP-IF) einen modellbasierten Ansatz zur Tourenplanung von Abfallsammelwagen vor. Dabei werden mehrere Fahrzeuge betrachtet, welche aus verschiedenen Depots losfahren, um Abfallbehälter zu leeren. Um eine variierende Häufigkeit von Entleerungen zu

³⁵ Bokinge und Hasselström 1980, Improved vehicle scheduling

³⁶ Kliewer 2005, Optimierung des Fahrzeugeinsatzes

³⁷ Schöbel 2017, An eigenmodel for iterative line planning

³⁸ Barco et al. 2017, Optimal Routing and Scheduling

³⁹ Beltran et al. 2009, Transit network design

⁴⁰ Dornbusch 2005, Grundsätzliche Anforderungen, S. 8–13

berücksichtigen, werden Besuchsmuster erstellt. Ist die maximale Ladekapazität eines Fahrzeugs erreicht, muss dieses zu einer Entladestation (Intermediate Facility) fahren. Dabei ist eine Besonderheit, dass die Fahrzeuge unter Umständen aufgrund von Verträgen mit den Entladestationen nicht bei der nächstgelegenen Entladestation entladen dürfen.⁴¹ Eine spezielle Tourenplanung für elektrisch betriebene Abfallsammelwagen lässt sich aktuell in der Fachliteratur nicht finden.

2.1.4 Anforderungen kommunaler Flotten an die Ladeinfrastrukturplanung

Die drei in dieser Arbeit betrachteten Fahrzeugflotten im kommunalen Einsatz (Pflegedienste, Busse im ÖPNV und Abfallsammelwagen) zeichnen sich durch unterschiedliche Einsatzabläufe aus. Während Pflegedienste eher lokal verkehren, müssen Busse und Abfallsammelwagen mitunter täglich weite Distanzen zurücklegen. Weiterhin bestehen große Unterschiede bei den Standzeiten der Fahrzeuge. Die Fahrzeuge von Pflegediensten haben einen sehr hohen Anteil an Standzeiten, während Busse nur kurz an Haltestellen stehen und Abfallsammelwagen im Idealfall keine Standzeiten aufweisen. Da bei einer Elektrifizierung dieser Fahrzeugflotten Standzeiten die einzigen Möglichkeiten zum Laden an Ladesäulen darstellen, ist eine Betrachtung der unterschiedlichen Standzeiten in einem Modell zur Ladeinfrastrukturplanung essenziell. Darüber hinaus kann ein Zuführen von Energie zu den Fahrzeugen an Batteriewechselstationen ohne ein relevantes Unterbrechen der Einsatzabläufe erfolgen und muss deshalb auch in einem Modell zur Ladeinfrastrukturplanung berücksichtigt werden. Die Batterie stellt mit bis zu 40 % des Gesamtpreises den größten Kostenfaktor eines BEV dar.⁴² Insbesondere bei Nutzfahrzeugen kann die Batteriegröße nach Kundenanforderungen dimensioniert werden.⁴³ Daher muss bei der Planung von Ladeinfrastruktur auch die Größe der Batterie und damit die Reichweite berücksichtigt werden.

2.2 Modelle zur Ladeinfrastrukturplanung

Grundsätzlich kann Ladeinfrastrukturplanung auf Basis von Supply-Chain-Modellen, dynamischer Programmierung, Geoinformationssystemen oder Operation Research Standortplanungsmodellen erfolgen.⁴⁴ Ferner können Standortplanungsmodelle in analytische Modelle, kontinuierliche Modelle, diskrete Modelle und Netzwerkmodelle unterschieden werden. Diskrete Modelle und Netzwerkmodelle werden mithilfe von gemischt-ganzzahligen Programmen

⁴¹ Edlinger 2011, Optimierung der periodischen Tourenplanung

⁴² ElektroMobilität NRW (Hg.) Juli 2016, Elektromobilität kurz erklärt, S. 9

⁴³ Kilimann 02.09.2015, Elektromobilität: Neue Busse

⁴⁴ Kim und Kuby 2012, The deviation-flow refueling location model, S. 5407

(engl. Mixed Integer Programming) modelliert. In Netzwerkmodellen wird der Lösungsraum durch einen Graphen $G = (N, E)$ mit einer Menge N von Knoten und einer Menge A von Kanten diskretisiert. Dabei können sowohl Knoten, als auch Kanten zur Modellierung des Bedarfs oder zur Modellierung potentieller Standorte verwendet werden.⁴⁵ Netzwerkmodelle finden in vielen wissenschaftlichen Untersuchungen zur Planung von Ladeinfrastruktur Verwendung.

Bisherige Forschungsaktivitäten zur Planung von Ladeinfrastruktur mit Netzwerkmodellen können hinsichtlich der Art der Bedarfsaggregation in drei unterschiedliche Ansätze untergliedert werden: knotenbasierte, flussbasierte und kantenbasierte Allokationsmodelle.⁴⁶ Laut Upchurch u. Kuby (2005) weisen kantenbasierte Modelle den Nachteil in der Planung der Ladeinfrastruktur für BEVs auf, dass Fahrten fälschlicherweise mehrfach berücksichtigt werden; sie werden deshalb im Nachfolgenden nicht weiter betrachtet.⁴⁷ Neben diesen generischen Modellen existieren auch Modelle, welche eine flussbasierte und knotenbasierte Aggregation der Nachfrage kombinieren. Zum Beispiel haben Hodgson u. Rosing (1992) und Berman (1997) einen Flow-Capturing- und einen p-Median/Max-Covering-Ansatz kombiniert.⁴⁸

2.2.1 Knotenbasierte Bedarfsaggregation

Knotenbasierte Allokationsmodelle aggregieren den Ladebedarf von BEVs an den Knoten eines Netzwerkgraphen. Die meisten knotenbasierten Allokationsmodelle minimieren die gewichtete Gesamtdistanz zwischen Nachfrageknoten und der nächsten Ladestation oder die Summe der Investitions- und Fahrtkosten.⁴⁹ Die Nachfrage an den Nachfrageknoten wird bei diesen Modellen im Preprocessing berechnet.⁵⁰ Daskin et al. (2008) und Ko et al. (2017) stellen die unterschiedlichen knotenbasierten Modellierungsansätze von Allokationsmodellen (Location-Set-Covering-Problem (LSCP), Maximum-Covering-Location-Problem (MCLP), p-Center-Problem (pCP), p-Median-Problem (pMP), Fixed-Charge-Location-Problem (FCLP)) vor und geben eine umfangreiche Auflistung der neusten Publikationen auf dem Forschungsgebiet knotenbasierter Modelle zur Ladeinfrastrukturplanung.⁵¹ Grundsätzlich entsprechen die zur Ladeinfrastrukturplanung verwendeten Ansätze auch denen zur Planung der Infrastruktur für Wasserstofffahrzeuge. Nachfolgend soll deshalb ein verkürzter Überblick über die wichtigsten

⁴⁵ Daskin 2008, What you should know about location modeling, S. 283–285

⁴⁶ Upchurch und Kuby 2010, Comparing the p-median, S. 750-751; Chen et al. 2013, Locating Electric Vehicle Charging Stations, S. 29

⁴⁷ Upchurch und Kuby 2010, Comparing the p-median, S. 751

⁴⁸ Berman 1997, Deterministic flow-demand location problems; John Hodgson et al. 1996, Applying the flow-capturing

⁴⁹ Scheiper et al. 2018, The flow refueling location problem, S. 2

⁵⁰ Schiffer und Walther 2017, The electric location routing problem, S. 998

⁵¹ Ko et al. 2017, Locating refuelling stations; Daskin 2008, What you should know about location modeling

Publikationen auf dem Gebiet knotenbasierter Planung von Ladeinfrastruktur bzw. von Wasserstofftankstellen gegeben werden.

Nicholas et al. (2004) benutzen ein pMP, um die benötigte Anzahl an Wasserstofftankstellen auf Basis der durchschnittlichen Fahrzeit zur nächsten Tankstelle zu bestimmen.⁵² Nicholas u. Ogden (2006) berechnen die optimalen Positionen von Wasserstofftankstellen, indem sie die durchschnittliche Fahrzeit aller Fahrzeuge zur nächsten Tankstelle in einem pMP minimieren. Dazu aggregieren sie die Nachfrage an den Knoten anhand von Bevölkerungsdichte, Präferenzen und akzeptierten Fahrzeiten. Das Ergebnis geben sie als prozentualen Anteil der benötigten Tankstellen an der Bevölkerungszahl in den Regionen an.⁵³ Lin et al. (2008) schlagen in ihrer Arbeit ein Fuel-Travel-Back-Modell vor, für welches der Kraftstoffbedarf von Wasserstoffautos nur auf Basis der Verteilung der zurückgelegten Kilometer bestimmt wird. Das Modell entspricht einem pMP, bei dem die gewichtete Summe der zurückgelegten Distanz an jeder Straßenkreuzung minimiert wird.⁵⁴ Ip et al. (2010) bestimmen den Ladebedarf, indem sie in einem zweistufigen Prozess zunächst Straßendaten in Punktdaten überführen und anschließend in Bedarfsclustern zusammenfassen. Sie minimieren die Gesamtkosten der zur Deckung dieser Bedarfscluster notwendigen Ladestationen.⁵⁵ Andrews et al. (2013) stellen ein Modell zur Lokation von Ladeinfrastruktur in den Metropolen Chicago und Seattle vor, welches die benötigte Gesamtfahrstrecke zum Erreichen von Ladestationen minimiert. Nur Fahrzeuge, welche aufgrund der beschränkten Reichweite ihre Fahrt nicht vollständig abschließen können, werden dabei berücksichtigt. Weiterhin beachten sie bei der Aggregation der Nachfragen die Mobilitätsbedürfnisse der Fahrer, welche ihnen aus Umfragen vorliegen.⁵⁶ Chen et al. (2013) optimieren in ihrer Publikation ebenfalls die Ladeinfrastruktur für BEVs in Seattle. Dabei greifen sie auf Parkinformationen (Dauer und Ort) aus mehr als 30.000 aufgezeichneten Fahrten zurück. Sie minimieren die Gesamtentfernung zwischen potentiellen Ladestationen auf den Parkplätzen und den von dort aus zu Fuß erreichbaren Zielen der Fahrer. Die Parkplätze dienen als potentielle Standorte für Ladestationen.⁵⁷ Mehar u. Senouci (2013) bestimmen die Standorte von Ladestationen, indem sie eine konvexe Zielfunktion bestehend aus Investitions- und Fahrtkosten minimieren. Dazu bestimmen sie den Ladebedarf durch Clustering des Verkehrsaufkommens in der Stadt Köln. Außerdem berücksichtigt ihr Modell die Kapazität der Ladestationen. Zur Reduktion der Rechenzeit stellen sie weiterhin einen angepassten genetischen Algorithmus

⁵² Nicholas et al. 2004, Using Geographic Information Systems

⁵³ Nicholas und Ogden 2006, Detailed Analysis of Urban Station Siting

⁵⁴ Lin et al. 2008, The fuel-travel-back approach

⁵⁵ Ip et al. 2010, Optimization for allocating BEV recharging stations

⁵⁶ Andrews et al. 2013, Modeling and Optimization

⁵⁷ Chen et al. 2013, Locating Electric Vehicle Charging Stations

vor.⁵⁸ Cai et al. (2014) präsentieren einen alternativen Ansatz der Datengenerierung. Sie ermitteln Hot-Spots hoher Parkaktivität aus den Trajektoriedaten von 11.880 Pekingener PHEV-Taxen. Auf Basis der Parkaktivität schätzen sie den Ladebedarf ab.⁵⁹

2.2.2 Flussbasierte Bedarfsaggregation

Im Gegensatz zu knotenbasierten wird in flussbasierten Modellen der Ladebedarf von BEVs durch Verkehrsflüsse von einem Startknoten (engl. origin) zu einem Zielknoten (engl. destination) abgebildet. Dadurch bleibt der ursprüngliche Informationsgehalt erhalten. Die Verkehrsdaten werden dabei in einer Origin-Destination-Matrix (OD-Matrix) gespeichert. Die Einträge der Matrix geben jeweils die Anzahl der Fahrzeuge an, welche von einem Startknoten zu einem Zielknoten fahren.⁶⁰

Hodgson (1981) und später unabhängig Berman et al. (1992) sind die ersten Forscher, die in ihren Modellen zur Infrastrukturplanung flussbasierte Bedarfsaggregation einsetzen. Diese Entwicklung beruht auf der Feststellung, dass bisherige Ansätze die Distanz zwischen Wohnort der Kunden und der jeweiligen Infrastruktur minimieren. Somit gehen diese Ansätze davon aus, dass immer vom Wohnort zur jeweiligen Infrastruktur und zurück gefahren wird. Vielmehr ist es sinnvoll, Infrastruktur in der Nähe von täglichen Fahrrouten zu platzieren. Da Fahrzeuge auf einer Tour mehrere Kanten passieren, führen kantenbasierte Ansätze zur gegenseitigen Kannibalisierung von Infrastruktureinrichtungen. Deshalb entwickeln sie das Flow-Capturing-(Intercepting)-Location-Model (FCLM (FILM)), welches auf detaillierten OD-Flussdaten basiert. Dabei ist es das Optimierungsziel dieses Modells, bei einer gegebenen Anzahl von Infrastruktureinrichtungen die Anzahl der Flüsse von Kunden, welche von Infrastruktureinrichtungen abgedeckt (engl. intercepted) werden, zu maximieren. Ein Fluss gilt als abgedeckt, wenn mindestens eine Infrastruktureinrichtung sich auf diesem Fluss befindet. Strukturell entspricht das FCLM somit einem MCLP.⁶¹

Bei einem FCLM zur Planung von Ladeinfrastruktur würde ein Verkehrsfluss als abgedeckt gelten, sobald eine Ladestation entlang dieses Flusses errichtet ist. Diese Annahme berücksichtigt somit nicht die eingeschränkte Reichweite von BEVs, welche auf einer längeren Fahrt mehrfach nachgeladen werden müssen. Deshalb erweitern Kuby u. Lim (2005) das FCLM zu einem Flow-Refueling-Location-Problem (FRLP). Dieses berücksichtigt explizit die eingeschränkte Reichweite von BEVs. Die zur Abdeckung eines Verkehrsflusses notwendige Anzahl

⁵⁸ Mehar und Senouci 2013, An optimization location scheme

⁵⁹ Cai et al. 2014, Siting public electric vehicle charging stations

⁶⁰ Hosseini et al. 2017, Deviation-flow refueling location problem, S. 270

⁶¹ John Hodgson 1981, The location of public facilities; Berman et al. 1992, Optimal Location of Service Facilities

an Ladestationen hängt dabei von der Fahrdistanz ab. In einer Preprocessing-Phase generieren sie zunächst alle gültigen Kombinationen an Ladestationen, welche den jeweiligen Verkehrsfluss abdecken können. Ein Verkehrsfluss gilt als abgedeckt, wenn für diesen mindestens eine gültige Kombination an Ladestationen errichtet wird. Die in der Preprocessing-Phase generierte hohe Anzahl an Kombinationen macht das Problem schon für mittelgroße Probleminstanzen unlösbar. Das Optimierungsziel des FRLP ist, wie beim FCLM, mit einer gegebenen Anzahl an p-Ladestationen möglichst viele Verkehrsflüsse abzudecken.⁶² Um das aufwendige Generieren von Kombinationen zu vermeiden und die Laufzeit zu reduzieren, stellen Kuby u. Lim (2010) drei Heuristiken in Form genetischer Algorithmen zur Lösung des FRLP vor.⁶³ Darüber hinaus entwickeln Capar u. Kuby (2012) und Capar et al. (2013) eine Arc-Cover/Path-Cover-Formulierung (AC-PC) des FRLP, die eine vergleichbare Rechenzeit wie die Greedy-Heuristiken von Kuby u. Lim (2010) benötigt. Beim AC-PC Ansatz wird die Zulässigkeit der Lösung an den Kanten anstatt an den einzelnen Flüssen evaluiert und somit ein Preprocessing, wie beim FRLP, überflüssig.⁶⁴ Kuby u. Lim (2007) schlagen eine Erweiterung des FRLP vor, bei der Ladestationen nicht nur an den Knoten des Netzgraphen, sondern auch auf den Kanten errichtet werden können.⁶⁵ Während die bisher genannten Ansätze zur Planung von Ladeinfrastruktur das Optimierungsziel haben, möglichst viele Verkehrsflüsse abzudecken, hat das Modell von Wang und Lin (2009) das Ziel, die Kosten zur Abdeckung aller Verkehrsflüsse mit Ladeinfrastruktur zu minimieren. In ihrem Flowbased-Set-Covering-Location-Model (FSCLM) wird eine komplexere aber flexiblere „Vehicle Refueling Logic“ verwendet, welche als Eingangsgröße nur die Distanzen zwischen den OD-Paaren und nicht die vollständigen Flussdaten benötigt. Diese beinhaltet jedoch deutlich mehr Nebenbedingungen und ist daher nicht einfach exakt zu lösen.⁶⁶ Upchurch et al. (2009) stellen mit dem Capacitated-Flow-Refueling-Location-Model (CFRLM) eine Ergänzung des FRLP vor. Im CFRLM werden Kapazitätslimits der Ladestationen berücksichtigt. Sie minimieren ebenfalls wie Wang u. Lin (2009) die anfallenden Investitionskosten.⁶⁷ Wang u. Wang (2010) erweitern das Modell von Wang u. Lin (2009) und betrachten neben Überlandfahrten auch innerstädtische Fahrten. Sie verwenden ein bikriterielles Modell zur optimalen Positionierung von Ladeinfrastruktur. Zum einen minimieren sie die Errichtungskosten der Ladestationen auf der Autobahn (LSCP) und zum anderen maximieren

⁶² Kuby und Lim 2005, The flow-refueling location problem

⁶³ Lim und Kuby 2010, Heuristic algorithms for siting alternative-fuel stations

⁶⁴ Capar et al. 2013, An arc cover–path-cover formulation; Capar und Kuby 2012, An efficient formulation of the flow refueling

⁶⁵ Kuby und Lim 2007, Location of Alternative-Fuel Stations

⁶⁶ Wang und Lin 2009, Locating road-vehicle refueling stations

⁶⁷ Upchurch et al. 2009, A Model for Location of Capacitated Alternative-Fuel Stations

sie die Abdeckung des innerstädtischen Ladebedarfs (MCLP).⁶⁸ Wang u. Lin (2013) ergänzen das Modell von Wang u. Wang (2010) um die Betrachtung von Ladestationen mit unterschiedlicher Ladeleistung.⁶⁹ MirHassani u. Ebrazi (2013) formulieren das FRLP unter Verwendung eines im Preprocessing expandierten Graphen neu und können dadurch den Rechenaufwand im Vergleich zu anderen Formulierungen reduzieren. Mit dieser Neuformulierung lösen sie sowohl flussbasierte LSCP als auch MCLP.⁷⁰ Nie u. Ghamami (2013) bestimmen in ihrer Arbeit die Planung von Ladestationen entlang von Verkehrskorridoren. Sie minimieren unter Verwendung eines LSCP die Investitionskosten. Dabei berücksichtigen sie nicht nur die Kosten für die Installation der Ladeinfrastruktur, sondern auch die Kosten der Batterieherstellung. Weiterhin bilden sie in ihrem Modell neben der Möglichkeit Fahrzeuge aufzuladen, auch die Möglichkeit die Batterien in einer deutlich kürzeren Zeit in Batteriewechselstationen gegen volle Batterien zu tauschen, ab.⁷¹ Badri-Koochi u. Tavakkoli-Moghaddam (2012) stellen fest, dass bei den meisten Modellen die Planung der Ladeinfrastruktur einer statischen Betrachtung entspricht. Deshalb berücksichtigen sie in ihrem langfristigen Planungsmodell nicht nur die Kosten zur Errichtung der Ladeinfrastruktur, sondern auch Inflation und Deflation.⁷² Chung u. Kwon (2015) erweitern das FRLP zu einem Multi-Period-FRLP (MFRLP). Das MFRLP berücksichtigt für einen langfristigen Planungshorizont mehreren Zeitperioden und maximiert die Abdeckung von Verkehrsflüssen über den gesamten Betrachtungszeitraum.⁷³ Hwang et al. (2015) stellen ein FRLP -Modell zur Planung von Ladeinfrastruktur auf Autobahnen auf Basis eines gerichteten Graphen vor. Dabei berücksichtigen sie Rundtouren und die Zugänglichkeit der Ladestationen in Abhängigkeit der Fahrtrichtung.⁷⁴ Vries u. Duijzer (2017) entwickeln ein FRLP, welches die Reichweite von BEVs nicht als statisch annimmt, sondern auf einer stochastischen Verteilung basiert. Dabei müssen Fahrzeuge, welche aufgrund ihrer Reichweite die Fahrt vollständig absolvieren können, gar nicht erst betrachtet werden. Sie können zeigen, dass durch eine Betrachtung der verschiedenen Reichweiten, die Abdeckung mit Ladeinfrastruktur deutlich verbessert

⁶⁸ Wang und Wang 2010, Locating passenger vehicle refueling

⁶⁹ Wang und Lin 2013, Locating multiple types of recharging stations

⁷⁰ MirHassani und Ebrazi 2013, A Flexible Reformulation of the Refueling Station Location Problem

⁷¹ Nie und Ghamami 2013, A corridor-centric approach

⁷² Badri-Koochi und Tavakkoli-Moghaddam 2012, Determining optimal number and locations of alternativefuel stations

⁷³ Chung und Kwon 2015, Multi-period planning for electric car charging station locations

⁷⁴ Hwang et al. 2015, Infrastructure development for alternative fuel vehicles

werden kann.⁷⁵ Durch Aufteilen des FRLP in Subprobleme und die dadurch ermöglichte Parallelisierung der Berechnung können Tran et al. (2017) die Laufzeit deutlich reduzieren.⁷⁶ Scheiper et al. (2018) untersuchen in ihrem FRLP with Load-Flow-Control (FRLP-LFC) die Interdependenzen zwischen Stromnetz und der Planung der Ladeinfrastruktur für BEVs. Dazu minimieren sie bei vollständiger Abdeckung aller Verkehrsflüsse in drei Zielfunktionen: den gesamten Stromfluss im Stromnetz, den Anteil an konventionell hergestelltem Strom und den Überschuss an erneuerbarer Energie im Stromnetz.⁷⁷

Die bisher vorgestellten Varianten des FRLP gehen von einem fixen, durch die Verkehrsflüsse vorgegebenen Ladebedarf aus. Eine realistischere Modellierung, welche die Möglichkeit abbildet, dass Fahrzeuge Umwege zum Erreichen einer Ladestation fahren können, wird dabei nicht berücksichtigt. Dies führt bei Set-Covering-basierten Zielfunktionen dazu, dass deutlich mehr Ladestationen mit entsprechend mehr Leerlauf errichtet werden, als zur Versorgung aller Fahrzeuge notwendig wäre.⁷⁸ Insbesondere zur Darstellung von Einsparpotential bei der synergetischen Planung der Ladeinfrastruktur für unterschiedliche Fahrzeugflotten, würde bei solchen Modellen eine systematische Fehleinschätzung der Synergieeffekte entstehen. In letzter Zeit gibt es vermehrt Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Deviation-Flow-Refueling-Location-Modelle (DFRLM), welche die Möglichkeit von Umwegen in das FRLM integrieren. Erste Ansätze bei flussbasierten Modellen vom kürzesten vorbestimmten Fluss abzuweichen, präsentieren Berman et al. (1995).⁷⁹ Kim u. Kuby (2012) stellen als erste die Möglichkeit Umwege zu berücksichtigen, integriert in ein FRLP, als DFRLM vor. Dabei können Ladestationen mit unlimitierter Kapazität auf dem direkten Weg oder auf dem kleinsten Umweg vom ursprünglichen Weg zum Nachladen der Fahrzeuge verwendet werden. Das DFRLM maximiert den Anteil abgedeckter Verkehrsflüsse unter Zuhilfenahme von Strafkosten für gefahrene Umwege. Ihr Modell benötigt ein aufwendiges Preprocessing zur Generierung aller möglichen Stationskombinationen entlang jedes Umwegs. Daher ist das Modell für größere Probleminstanzen nicht lösbar.⁸⁰ Deshalb präsentieren Kim u. Kuby (2013) eine Heuristik zur Lösung des DFRLM basierend auf einem erweiterten Graphen.⁸¹ Jiang et al. (2012) kombinieren den Ansatz des

⁷⁵ Vries und Duijzer 2017, Incorporating driving range variability

⁷⁶ Tran et al. 2017, An efficient heuristic algorithm

⁷⁷ Scheiper et al. 2018, The flow refueling location problem

⁷⁸ Kim und Kuby 2012, The deviation-flow refueling location model, S. 5408

⁷⁹ Berman et al. 1995, Locating Discretionary Service Facilities

⁸⁰ Kim und Kuby 2012, The deviation-flow refueling location model

⁸¹ Kim und Kuby 2013, A network transformation heuristic

DFRLM mit dem eines CFRLM und lösen das Modell mithilfe eines genetischen Algorithmus.⁸² Huang et al. (2015) berücksichtigen in ihrem Modell die Möglichkeit mehrerer Umwege pro Verkehrsfluss. Dabei gilt ein Verkehrsfluss als abgedeckt, sobald der Ladebedarf auf mindestens einer Verbindungsstrecke jedes OD-Paars vollständig mit Ladestationen bedient werden kann. Sie minimieren die Errichtungskosten der Ladestationen, welche notwendig sind, um alle Verkehrsflüsse abzudecken.⁸³ Zockaie et al. (2016) betrachten in ihrer Variante des DFRLM die Kapazitätseinschränkungen von Ladestationen.⁸⁴ Yildiz et al. (2016) erweitern das FRLP um eine in das Modell integrierte Generierung der OD-Paare. So können sie Umwege abbilden, ohne diese vorher aufwendig zu generieren. Sie lösen das Modell unter Verwendung eines Branch-And-Price Algorithmus.⁸⁵ Das Mehrperioden-Modell von Bhatti et al. (2015) bildet ebenfalls die Möglichkeit von Umwegen ab.⁸⁶ Hosseini et al. (2017) präsentieren eine Neuformulierung des Capacitated-DFRLP (CDFRLP). Diese benötigt weder vorgenerierte Fahrwege noch zulässige Ladestationskombinationen. Die vorgestellte Heuristik zur Lösung dieses Modells teilt das eigentliche Problem in kleinere Subprobleme und verknüpft diese in einem Greedy-Ansatz.⁸⁷ Miralinaghi et al. (2017) ergänzen das DFRLM um eine Berücksichtigung von Nachfrageunsicherheit zu einem robusten Optimierungsmodell und lösen dieses mit einem Cutting-Plane Algorithmus.⁸⁸ Neuste Entwicklungen überführen die ursprünglich diskrete, auf einem Netzgraphen basierte Formulierung des DFRLM in eine kontinuierliche. So verwenden Hong et al. (2017) eine kontinuierliche Formulierung, um die Ladeinfrastruktur für Drohnen, welche anders als Straßenfahrzeuge nicht auf ein Wegenetz angewiesen sind, im städtischen Umfeld zu planen.⁸⁹ Kweon et al. (2018) optimieren die Abdeckung von Verkehrsflüssen bei einer gegebenen Anzahl an Ladestationen für Straßenbasierte-Transportnetzwerke auf Basis der kontinuierlichen Formulierung.⁹⁰

⁸² Jiang et al. 2012, Capacitated Deviation-Flow Fueling Location

⁸³ Huang et al. 2015, Optimal Deployment of Alternative Fueling Stations

⁸⁴ Zockaie et al. 2016, Solving Detour-Based Fuel Stations

⁸⁵ Yildiz et al. 2016, A branch and price approach

⁸⁶ Bhatti et al. 2015, Alternative fuel station location

⁸⁷ Hosseini et al. 2017, Deviation-flow refueling location problem

⁸⁸ Miralinaghi et al. 2017, Refueling station location problem

⁸⁹ Hong et al. 2017, A Deviation Flow Refueling Location Model

⁹⁰ Kweon et al. 2017, A Continuous Deviation-Flow Location Problem

2.2.3 Simultane Routing- und Lokationsmodelle

Bei einem FRLP wird, wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, der Ladebedarf von BEVs an Hand von Verkehrsflüssen modelliert. Diese entsprechen vorbestimmten Daten, welche entweder gemessen oder in einem Preprocessing-Schritt generiert werden. Die Annahme eines vorbestimmten Bedarfs wird durch das Zulassen von Umleitungen in DFRLM etwas gelockert. Dabei wird jedoch nicht berücksichtigt, dass sich das Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer durch die Umstellung auf elektrisch betriebene Fahrzeuge ändern kann. Vor allem für Betreiber von BEVs in kommerziellen Flotten ist es aber von besonderem Interesse, sowohl die Ladeinfrastruktur kostenoptimal zu planen, als auch diese möglichst wirtschaftlich durch angepasste Tourenplanung mit ihren BEVs auszulasten. Eine Modellierung eines solchen simultanen Touren- und Ladeinfrastrukturplanungsproblems bietet das Electric-(Vehicle-)Location-Routing-Problem (ELRP).

Einen ersten Ansatz zur simultanen Tourenplanung und Planung von Ladeinfrastruktur stellen Yang u. Sun (2015) vor. Sie betrachten die Flotten von Logistikdienstleistern, welche statt zu laden an Batteriewechselstationen ihre Batterie gegen eine volle tauschen können. Zur Lösung des Problems entwickeln sie mehrere Heuristiken.⁹¹ Schiffer u. Walther (2017) ergänzen das ELRP um die Betrachtung von Zeitfenstern und die Möglichkeit von partieller Aufladungen zu einem ELRP with Time Windows and partial Recharging (ELRP-TWPR). Insgesamt werden fünf Zielfunktionen entwickelt. Eine davon minimiert die Gesamtkosten für den Flottenbetreiber. Dabei finden Anschaffungskosten für die Fahrzeuge, die Kosten für die Errichtung von Ladestationen und operative Kosten auf Basis der zurückgelegten Strecke Berücksichtigung. Aufgrund von notwendigen Dummy-Knoten, der Zeitfenster-Nebenbedingungen und der Lade-Nebenbedingungen wird das Modell sogar für kleine Instanzen sehr rechenaufwendig. Deshalb werden unlösbare Kanten aus dem Netzgraphen entfernt, Nebenbedingungen auf Basis der Dreiecksungleichung umformuliert und untere Schranken für die Anzahl an Fahrzeugen und die Anzahl der Ladestationen eingeführt.⁹² Paz et al. (2018) erweitern die Modellierung von Schiffer u. Walther (2017) um eine Betrachtung von mehreren Fahrzeugdepots. Des Weiteren berücksichtigen sie sowohl die Möglichkeit des Nachladens als auch von Batteriewechselstationen.⁹³

⁹¹ Yang und Sun 2015, Battery swap station location-routing

⁹² Schiffer und Walther 2017, The electric location routing problem

⁹³ Paz et al. 2018, The multi-depot electric vehicle location routing problem

2.2.4 Vergleich relevanter Modellierungsansätze

Die Beantwortung der Forschungsfragen in dieser Arbeit stellt gewisse Anforderungen an den verwendeten Modellierungsansatz zur Planung von Ladeinfrastruktur für BEVs. Zum einen muss der Modellierungsansatz die Möglichkeit bieten, für stark heterogene Flotten unter Berücksichtigung der spezifischen Einsatzbedingungen im kommunalen Einsatz und für eine große Anzahl an Fahrzeugen Ladeinfrastruktur zu planen. Zum anderen müssen Synergieeffekte bei einer gemeinschaftlichen Planung der Ladeinfrastruktur für die unterschiedlichen kommunalen Flotten gemessen werden können. In den vorgestellten Modellierungsansätzen werden diese Anforderungen unterschiedlich gut erfüllt.

Bei knotenbasierten Planungsansätzen wird der Ladebedarf an Knoten (z. B. aus Fahrprofilen) generiert. Dadurch wird der ursprünglich vorhandene Informationsgehalt reduziert. Das kann dazu führen, dass eine optimale Lösung nicht ermittelt werden kann. Wird die Nachfrage eines potentiellen Standorts auf Basis des an diesem Standort vorbeifließenden Verkehrs aggregiert, kann nicht ausgeschlossen werden, dass Verkehrsflüsse mehrfach gezählt werden. Dies führt dazu, dass Ladestationen doppelt berücksichtigt werden oder Ladestationen sich gegenseitig kannibalisieren.⁹⁴ Des Weiteren wird bei solchen pMP basierten Ansätzen nicht die eingeschränkte Reichweite von BEVs berücksichtigt. Aus diesen Gründen werden im Nachfolgenden knotenbasierte Ansätze zur Planung von Ladeinfrastruktur für Flotten im kommunalen Einsatz nicht weiter berücksichtigt.

Ein weiteres Bewertungskriterium relevanter Modellierungsansätze ist die Eignung zur Bestimmung von Synergieeffekten bei einer gemeinschaftlichen Planung der Ladeinfrastruktur für die unterschiedlichen kommunalen Flotten. Synergieeffekten können durch eine Bestimmung der eingesparten Ladestationen/Batteriewechselstationen bei einer gemeinschaftlichen Planung im Vergleich zu einer separaten Planung für die einzelnen Flotten gemessen werden (vgl. Abschnitt 3.1). Dieses Vorgehen setzt bei der Modellformulierung einen Ansatz voraus, der die Anzahl der errichteten Ladestationen bei vollständiger Abdeckung des gesamten Ladebedarfs aller Fahrzeuge minimiert. Somit wird bei den zugrunde liegenden Modellierungsansätzen zur Ladeinfrastrukturplanung eine Location-Set-Covering-Formulierung gefordert und daher alle auf einer Maximum-Covering-Location-Formulierung basierende Modellierungsansätze ausgeschlossen. Weiterhin können Synergieeffekte nur detailliert abgebildet werden, wenn die zugrunde liegende Modellformulierung eine möglichst hohe Flexibilität in den Randbedingungen ermöglicht. Dazu zählen eine flexible Tourenplanung der Fahrzeuge, eine Berücksichtigung von partiellem Aufladen und eine Betrachtung von variablen Batteriekapazitäten.

⁹⁴ Hodgson 1990, A Flow-Capturing Location-Allocation Model

In den vorgestellten Modellierungsansätzen werden die wesentlichen Anforderungen zur Bestimmung von Synergieeffekten bei der Planung von Ladeinfrastruktur für BEVs im kommunalen Einsatz (vgl. 2.1.4) nur eingeschränkt berücksichtigt. Tabelle 2.1 vergleicht relevante Modellierungsansätze in Hinblick auf die Erfüllung dieser Anforderungen. Grundsätzlich lassen sich die aufgeführten Modellierungsansätze in FRLP (I-III), DFRLP (IV-V) und ELRP (VI-VII) untergliedern. DFRLP unterscheiden sich von den FRLP im Wesentlichen dadurch, dass diese die Möglichkeit von vorgegebenen Umwegen modellieren und damit eine flexiblere Tourenplanung bei der Planung von Ladeinfrastruktur berücksichtigen können. Darüber hinaus basieren ELRP nicht auf vorgegebenen Flussdaten, sondern bestimmen Touren und die Lokalisierung von Ladeinfrastruktur simultan. Dieses Vorgehen gewährleistet maximale Flexibilität; verursacht aber einen hohen Rechenaufwand und macht daher ELRP nur für kleine Instanzen lösbar. Eine Betrachtung von kleineren Instanzen würde aber wiederum die abgebildeten Synergieeffekte reduzieren.

Keiner der vorgestellten Modellierungsansätze erfüllt die essentiellen Anforderungen in Hinblick auf eine Betrachtung von Zeitfenstern, eine Berücksichtigung von partiellem Aufladen und eine Untersuchung von variablen Batteriekapazitäten. Deshalb wird in dieser Arbeit das DFRLM with Time-Windows and variable Battery Capacity formuliert. Dieses erweitert das DFRLM um eine Betrachtung von Zeitfenstern, partiellem Aufladen, Ladestationen sowie Batteriewechselstationen und variable Batteriekapazitäten (vgl. Tabelle 2.1 (VIII)).

Tabelle 2.1.: Vergleich relevanter Modellierungsansätze

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Lokationsentscheidung	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Betrachtung von Zeitfenstern							✓	✓
flexible Tourenplanung				(✓)	(✓)	✓	✓	(✓)
Rundtouren			✓	✓	✓	✓	✓	✓
mehrfaches Besuchen einer Ladestation			✓		✓		✓	✓
Reichweitenlimitation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
vollständiges Aufladen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
partielltes Aufladen			✓				✓	✓
Batteriewechselstationen						✓		✓
variable Batteriekapazität								✓

I-VIII kennzeichnen die Publikationen wie folgend: (I) Kuby u. Lim (2005)⁹⁵; (II) MirHassani u. Ebrazi (2013)⁹⁶; (III) Scheiper et al. (2018)⁹⁷; (IV) Kim u. Kuby (2012)⁹⁸; (V) Hosseini et al. (2017)⁹⁹; (VI) Yang u. Sun (2015)¹⁰⁰; (VII) Schiffer u. Walther (2017)¹⁰¹; (VIII) Schuster (2018)

⁹⁵ Kuby und Lim 2005, The flow-refueling location problem

⁹⁶ MirHassani und Ebrazi 2013, A Flexible Reformulation of the Refueling Station Location Problem

⁹⁷ Scheiper et al. 2018, The flow refueling location problem

⁹⁸ Kim und Kuby 2012, The deviation-flow refueling location model

⁹⁹ Hosseini et al. 2017, Deviation-flow refueling location problem

¹⁰⁰ Yang und Sun 2015, Battery swap station location-routing

¹⁰¹ Schiffer und Walther 2017, The electric location routing problem

3 Modellformulierung

In diesem Kapitel wird zunächst das Vorgehen zur Bestimmung von Synergieeffekten entwickelt. Anschließend wird die Modellformulierung des DFRLM-TW-VBC vorgestellt. Dazu werden in Abschnitt 3.2 die bei der Modellformulierung getroffenen Annahmen beschrieben. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 3.3 das Modell ausformuliert.

3.1 Bestimmung von Synergieeffekten

Die Bestimmung von Synergieeffekten kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Bei einfachen Modellen, welche nur einen Typ von Ladestationen betrachten, können Synergieeffekte an Hand von eingesparten Ladestationen quantifiziert werden. Dazu muss zunächst die benötigte Ladeinfrastruktur für die einzelnen Flotten in separaten Modellinstanzen bestimmt werden (vgl. Abbildung 3.1). Eine Vereinigungsmenge der in diesen Instanzen errichteten Ladesäulen stellt die bei separater Planung, insgesamt errichtete Ladeinfrastruktur dar. Anschließend kann in einer weiteren Modellinstanz die Ladeinfrastruktur in einer gemeinschaftlichen Planung für alle kommunalen Flotten bestimmt werden. Wird die Schnittmenge aus der Menge bei einzelner Planung errichteter Ladestationen und der Menge bei gemeinschaftlicher Planung errichteter Ladestationen gebildet, ergibt sich die Menge durch Synergieeffekte eingesparter Ladestationen. Für komplexere Modelle, welche z. B. zusätzlich Batteriewechselstationen oder variable Batteriekapazitäten betrachten, können Synergieeffekte auf Basis von eingesparten Investitionskosten bestimmt werden. Dazu wird, ähnlich dem in Abbildung 3.1 dargestellten Vorgehen, zunächst für jede Fahrzeugflotte in einer separaten Modellinstanz die Ladeinfrastruktur optimiert. Aus diesen drei Instanzen ergibt sich dann aus der Menge aller errichteter Ladestationen und Batteriewechselstationen die für die Ladeinfrastruktur notwendige Investitionssumme. Ferner werden bei einer Betrachtung variabler Batteriekapazitäten auch die Kosten für die Batterie zu den Investitionskosten hinzugezogen. Anschließend wird die Ladeinfrastruktur in einer weiteren Modellinstanz gemeinschaftlich für alle kommunalen Flotten bestimmt. Aus der Differenz der notwendigen Investitionskosten bei einzelner Planung und der notwendigen Investitionskosten bei gemeinschaftlicher Planung ergibt sich das Einsparungspotential durch Synergieeffekte. Dieses Vorgehen setzt eine Minimierung der Kosten als Zielfunktion bei der Optimierung voraus.

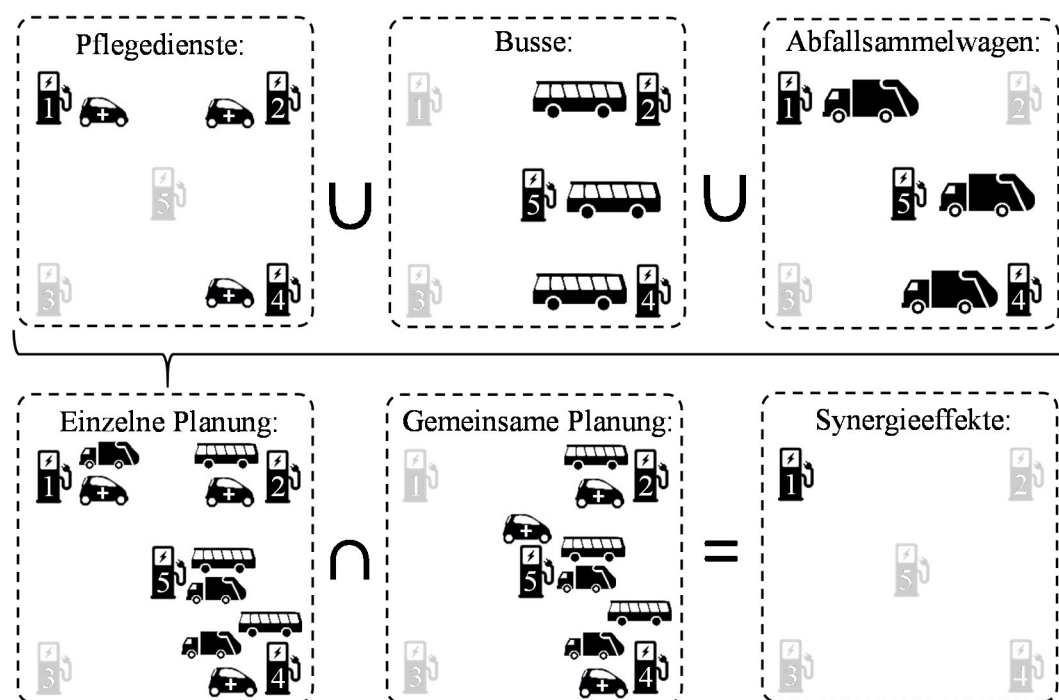


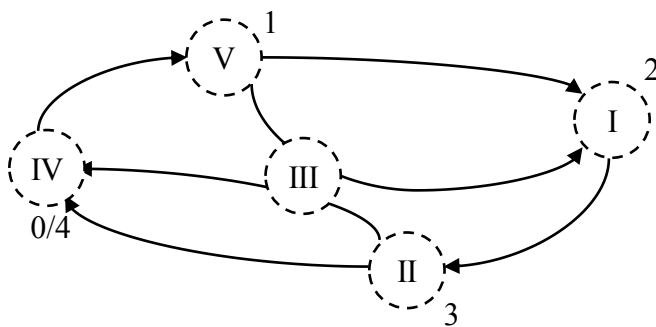
Abbildung 3.1: Bestimmung von Synergieeffekten

3.2 Annahmen für das Modell

Für die Modellformulierung wird grundlegend angenommen, dass BEVs Fahrzeuge mit herkömmlichen Antrieben im kommunalen Einsatz nur substituieren können, wenn dadurch dem jeweiligen Flottenbetreiber keine wirtschaftlichen Nachteile entstehen. Dass bedeutet, die bei BEVs notwendigen Ladezeiten dürfen weder die Länge von Einsatzfahrten (zusätzliche Personalkosten), noch die Gesamtzahl benötigter Fahrzeuge (zusätzliche Investitionskosten) erhöhen. Daraus ergeben sich zwei Implikationen für die Modellierung. Zum einen müssen die Einsatzpläne inklusive aller Stand-, Fahr- und Ankunftszeiten im Modell abgebildet werden, sodass nur bereits vorhandene Standzeiten an planmäßig angefahrenen Standorten zum Laden benutzt werden können. Zum anderen müssen bestimmte Fahrstrecken, z. B. Linienfahrten von Bussen, vorgegeben werden. Andere Fahrstrecken, wie z. B. Leerfahrten zwischen zwei Fahrgastfahrten bei Bussen, dürfen im zeitlich verfügbaren Rahmen zum Erreichen von Ladestationen von der ursprünglichen Tourenplanung abweichen. Um dennoch Synergieeffekte bei der gemeinschaftlichen Planung der Ladeinfrastruktur für die unterschiedlichen Flotten im kommunalen Einsatz im Modell abbilden zu können, ist es wichtig, den verbleibenden Spielraum vollständig und flexibel zu modellieren. Deshalb werden in der Modellformulierung teilweises Aufladen, variable Batteriekapazitäten der Fahrzeuge und Ladestationen sowie Batteriewechselstationen, inklusive der Betrachtung, dass nur manche Fahrzeuge für einen Batteriewechsel technisch ausgestattet sein können, abgebildet.

Als Basis für eine solche Formulierung bietet sich ein DFRLP an. Denn zum einen können die vorgegebenen Touren der einzelnen Fahrzeuge in einer DFRLP-Formulierung als Flussdaten abgebildet werden. Zum anderen können für manche Tourenabschnitte zulässige Umwege zum Erreichen einer Ladestation modelliert werden. Weiterhin ist das DFRLP für die Flottengröße kommunaler Unternehmen in annehmbarer Zeit lösbar. Bei der Formulierung des DFRLM-TW-VBC in dieser Arbeit wird, über die grundlegende Idee eines DFRLP (Ladebedarf auf Basis von Flussdaten darzustellen und Umwege zu betrachten) hinausgehend, auf Elemente von ELRPs zurückgegriffen. So wird für jeden von den Fahrzeugen auf den Flüssen angefahrenen Wegpunkt der Ladestatus (engl. State of Charge (SOC)) und die Ankunftszeit am Wegpunkt in der Modellierung als Variable eingeführt. Auf Basis der Ankunftszeit lassen sich mit Nebenbedingungen Mindeststandzeit, Fahrzeiten und feste Ankunftszeiten abbilden.

Basierend auf diesen Annahmen existiert ein Graph für das Straßensystem $G_S = (N, E)$, in dem jeder Knoten N einen potentiellen Standort für eine Ladestation und/oder Batteriewechselstation darstellt (s. Abbildung 3.2). Darüber hinaus existiert für jedes Fahrzeug ein, im Vergleich zum Straßensystem, gerichteter Graph $G_F = (P, A)$ (s. Abbildung 3.3). Jeder Knoten P steht dabei für einen Wegpunkt, der von dem Fahrzeug in streng geordneter Reihenfolge angefahren wird. Die Kanten A zwischen den Knoten werden durch einen Energieverbrauch des Fahrzeugs und durch eine benötigte Fahrzeit gekennzeichnet. Existiert für ein Fahrzeug an einem Wegpunkt keine Möglichkeit einen Umweg zu fahren, so besitzt dieser Wegpunkt nur zwei ausgehende Kanten (vgl. Abbildung 3.3 Wegpunkt „0“). Dabei steht das Befahren der einen Kante dafür, dass an der, am Wegpunkt befindlichen, Ladestation geladen wird (für Wegpunkt „0“ Ladestation IV) oder ohne zu laden, direkt zum nächsten Wegpunkt gefahren wird. Bei der Fahrt von Wegpunkt 1 zu Wegpunkt 2 kann zusätzlich ein Umweg über die, am Knoten III befindliche Ladestation gefahren werden. Durch das Einführen eines Graphen für jedes Fahrzeug ergibt sich der Vorteil, dass auf eine in der Literatur übliche Einführung von Dummy-Knoten zum Abbilden von Rundtours und dem mehrmaligen Anfahren von Ladestationen verzichtet werden kann. Durch eine Indextransformation kann bei der Einführung der Nebenbedingungen die Indexierung der Fahrzeuggraphen (im Beispiel 0-4) in die Indexierung des Straßensystems (im Beispiel I-V) überführt werden.

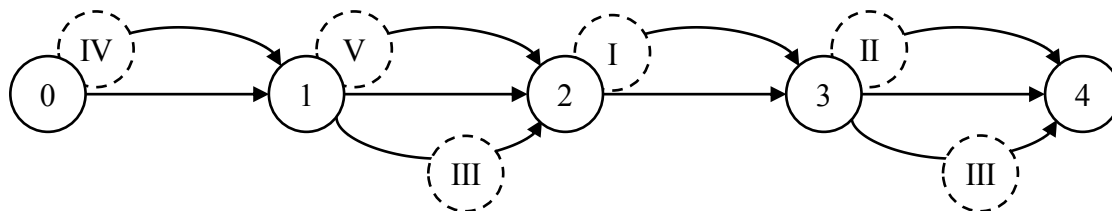


(---) – Potentielle Standorte der Ladestationen/Batteriewechselstationen

I - V – Indexierung der Knoten im Straßensystem Graph

0 - 4 – Indexierung der Wegpunkte im Fahrzeug Graph

Abbildung 3.2: Graph des Straßensystems



(---) – Potentielle Standorte der Ladestationen/Batteriewechselstationen

(○) – Wegpunkte des Fahrzeugs

I - V – Indexierung der Knoten im Straßensystem Graph

0 - 4 – Indexierung der Wegpunkte im Fahrzeug Graph

Abbildung 3.3: Graph des Fahrzeugs

Um die Synergieeffekte entsprechend dem in Abschnitt 3.1 vorgestellten Vorgehen zu bestimmen, wird die Annahme getroffen, dass eine optimale Planung der Ladeinfrastruktur investitionskostenminimal erfolgt. Dabei dient die monetäre Betrachtung nur dazu, die unterschiedlichen Technologien auf einer gemeinsamen Basis vergleichen zu können. Dazu werden die Investitionskosten für eine Ladestation bzw. Batteriewechselstation unabhängig von der tatsächlichen Auslastung angenommen. Ferner wird davon ausgegangen, dass die Ausrüstung eines Fahrzeugs mit der Technologie um Batteriewechsel durchführen zu können, für alle Fahrzeugtypen gleich teuer ist. Genauso wird die Annahme getroffen, dass der Preis einer Batterie unabhängig vom Fahrzeugtyp proportional zur Batteriekapazität ist. Eine Bestimmung der Investitionskosten im Sinne der dynamischen Investitionskostenrechnung erfolgt dabei nicht.

Bei der Modellformulierung wird angenommen, dass die Fahrzeuge kundenindividuell zusammengestellt werden können. Das betrifft zum einen die Batteriekapazität und die damit erreichbare Reichweite und zum anderen die technische Ausstattung zum Durchführen von Batterie-

wechseln. Durch eine Internalisierung dieser Entscheidungen in das Modell können die Fahrzeuge investitionskostenoptimal mit der Ladeinfrastruktur geplant werden. Somit können weitere Synergieeffekte einer gemeinschaftlichen Planung der Ladeinfrastruktur im Modell abgebildet werden. Ferner wird die Annahme getroffen, dass die dem Fahrzeug durch Laden zugeführte Energiemenge proportional zur Ladezeit ist, während ein Batteriewechsel keine Zeit benötigt. Um keinen SOC beim Verlassen des Depots für die einzelnen Fahrzeuge vorgeben zu müssen, wird der SOC beim Verlassen des Depots in Abhängigkeit vom SOC beim Erreichen des Depots und der Standzeit im Depot modelliert.

3.3 Das DFRLM with Time-Windows and variable Battery Capacity

Tabelle 3.1 stellt die vollständige Notation des DFRLM-TW-VBC dar. Dabei bezeichnet i den Index der Knoten im Graph des Straßensystems, an denen potentiell Ladestationen/Batteriewechselstationen errichtet werden können. Der Index q indiziert die einzelnen Fahrzeuge und die Indizes p, o bezeichnen die Wegpunkte der Fahrzeuge im Graph des Fahrzeugs. Als Parameter werden zum einen die Kosten zum Errichten einer Ladestation C^{Charge} , die Kosten zum Errichten einer Batteriewechselstation C^{Swap} , die Batteriekosten pro kWmin C^{Capacity} und die Kosten für die Ausstattung eines Fahrzeugs mit der Technologie zum Batteriewechsel $C_q^{\text{Swappable}}$ dem Modell übergeben. Zum anderen werden mit T_{pi}^q , S_p^q und $O_{(p,o)}^q$ Parameter für Fahr-, Ankunfts- und Mindeststandzeiten definiert. Die Parameter U_{pi}^q beschreiben die notwendige Energiemenge zum Befahren der jeweiligen Kanten in den Graphen der Fahrzeuge. Ferner geben die Parameter E^q die Ladeleistung der Fahrzeuge an. Die Funktion $i = f(p, q)$ dient dazu, die Indizierung der Wegpunkte p aus dem Graph des Fahrzeugs q in die Indizierung der Knoten i im Graph des Straßensystems zu überführen. Für jeden Knoten im Graph des Straßensystems werden mit y_i^{Charge} und y_i^{Swap} Binärvariablen definiert, welche angeben, ob an dem Knoten eine Ladestation / Batteriewechselstation errichtet wird. Ob ein Fahrzeug auf dem Weg von einem Wegpunkt zum nächsten über eine Ladestation / Batteriewechselstation am Knoten i fährt, ist durch die Variablen x_{pi}^q gegeben. Diese stellt maßgeblich die Verbindung zwischen dem Graph des Straßensystems und den Graphen der Fahrzeuge dar. Fährt ein Fahrzeug von einem Wegpunkt zum nächsten, ohne zu laden, so wird dies durch eine Fahrt über den Knoten „0“ abgebildet ($x_{p0}^q = 1$). Für die technische Ausstattung von jedem Fahrzeug werden weitere Variablen definiert. Die Variablen h^q geben an, ob das jeweilige Fahrzeug mit der notwendigen Technologie, um Batteriewechsel durchzuführen, ausgestattet ist. Die Variablen r^q beschreiben die Batteriekapazität des Fahrzeugs. Der Status eines jeden Fahrzeugs auf allen Wegpunkten wird durch die drei Variablen t_p^q , b_p^q und l_p^q gegeben. Die Variablen t_p^q bilden die Ankunftszeit des Fahrzeugs am entsprechenden Wegpunkt ab. Die in der Batterie gespeicherte

Energiemenge wird durch die Variablen b_p^q beschrieben. Weiterhin erfassen die Variablen l_p^q die am jeweiligen Wegpunkt nachgeladene Energiemenge.

Tabelle 3.1: Notation des Modells

i	Index der Knoten
q	Index der Fahrzeuge
p, o	Index der Wegpunkte
C^{Charge}	Kosten für die Errichtung einer Ladestation [€]
C^{Swap}	Kosten für die Errichtung einer Batteriewechselstation [€]
C^{Capacity}	Kosten für die Ausstattung eines Fahrzeugs mit einer Batteriekapazität von einer kWmin [€/kWmin]
$C_q^{\text{Swappable}}$	Kosten für die Ausstattung des Fahrzeugs q mit der Technologie um Batteriewechsel durchführen zu können [€]
T_{pi}^q	Zeitbedarf des Fahrzeugs q für das Zurücklegen der Strecke von Wegpunkt p über Knoten i [min]
S_p^q	Ankunftszeit des Fahrzeugs q am Wegpunkt p [min]
$O_{(p,o)}^q$	Mindeststandzeit des Fahrzeugs q zwischen Wegpunkt p und Wegpunkt o [min]
U_{pi}^q	Energiebedarf des Fahrzeugs q für das Zurücklegen der Strecke von Wegpunkt p über Knoten i [kWmin]
E^q	Ladeleistung des Fahrzeugs q [kW]
$R_{\min/\max}^q$	Mindest-/Maximalbatteriekapazität des Fahrzeugs q [kWmin]

N	Menge der Knoten
Q	Menge der Fahrzeuge
P_q	Menge der Wegpunkte des Fahrzeugs q
$D_{p\ q}$	Menge der Knoten, über die das Fahrzeugs q ausgehend von Wegpunkt p fahren kann
V_q	Menge der Wegpunkte des Fahrzeugs q , für die eine Ankunftszeit definiert ist
W_q	Menge der Wegpunkt-Tupel (p, o) des Fahrzeugs q zwischen denen eine Mindeststandzeit definiert ist
$i = f(p, q)$	Funktion die für den Wegpunkte p des Fahrzeugs q den Index des zugehörigen Knoten zurückgibt
y_i^{Charge}	binär: Ladestation an Knoten i errichtet
y_i^{Swap}	binär: Batteriewechselstation an Knoten i errichtet
$x_{p\ i}^q$	binär: Fahrzeugs q fährt von Wegpunkt p über eine am Knoten i errichtete Ladestation/Batteriewechselstation zum nächsten Wegpunkt; eine Fahrt über Knoten „0“ entspricht einer direkten Fahrt von Wegpunkt p ohne zu laden zum nächsten Wegpunkt
h^q	binär: Fahrzeug q mit der Technologie für einen Batteriewechsel ausgestattet
r^q	Batteriekapazität des Fahrzeugs q [kWmin]
t_p^q	Ankunftszeit des Fahrzeugs q am Wegpunkt p [min]
b_p^q	SOC der Batterie des Fahrzeugs q am Wegpunkt p [kWmin]
l_p^q	Lademenge des Fahrzeugs q am Wegpunkt p [kWmin]

Die **Zielfunktion** des Modells (3.1) minimiert die Kosten für die Errichtung von Ladestationen, Batteriewechselstationen sowie der Kosten für die Ausstattung der Fahrzeuge mit Batterien variabler Größe und der technischen Möglichkeit, Batteriewechsel durchzuführen. In den Nebenbedingungen (3.2) wird die **Flusserhaltung** für jedes Fahrzeug festgelegt. Dazu wird in den Bedingungen (3.2) definiert, dass jedes Fahrzeug q an jedem Wegpunkt p entweder direkt ohne zu laden zum nächsten Wegpunkt ($x_{p0}^q = 1$) fahren kann oder über eine Ladestation bzw. Batteriewechselstation am Knoten i zum nächsten Wegpunkt ($x_{pi}^q = 1$) fahren kann.

Der Teil des Modells, welcher die Einhaltung von **Fahrzeiten, Standzeiten und Ladezeiten** beschreibt, wird in den Nebenbedingungen (3.3) bis (3.5) festgelegt. Dabei definieren (3.3) in Anlehnung an die Formulierung eines VRP-TW den Zusammenhang zwischen Ankunftszeiten t_p^q und den Fahrzeiten T_{pi}^q für jedes Fahrzeug q am Wegpunkt p , in Abhängigkeit davon, über welchen Knoten i zum nächsten Wegpunkt gefahren wird. In den Nebenbedingungen (3.4) wird für eine Menge von Wegpunkten V_q des Fahrzeugs p eine fixe Ankunftszeit S_p^q am Wegpunkt festgelegt. Dies kann verwendet werden, um beispielsweise den strikten Zeitplan von Bussen im Fahrgastbetrieb zu modellieren. Die Restriktionen (3.5) bilden für ein Tupel an Wegpunkten (p, o) der Menge W_q eine Mindeststandzeit $O_{(p,o)}^q$ ab. Dabei kann das Verweilen des Fahrzeugs an allen Wegpunkten p bis $(o - 1)$ erfolgen. So kann zum Beispiel die Betreuungszeit beim Kunden für Pflegedienste für Wegpunkte in der Nähe des Kunden modelliert werden.

Der **SOC der Batterie** b_p^q und die **Lademenge** l_p^q werden in den Nebenbedingungen (3.6) bis (3.8) festgelegt. Bedingungen (3.6) ermitteln rekursiv für jeden befahrenen Wegpunkt p den zugehörigen SOC der Batterie b_p^q . Dabei werden die auf der Strecke verbrauchte Energie U_{pi}^q und die nachgeladene Energiemenge l_p^q berücksichtigt. Restriktionen (3.7) koppeln den SOC der Batterie für den ersten $p = 0$ und letzten $p = |P_q|$ Wegpunkt. So wird die Entscheidung, eine Ladestation im Depot zu errichten, in das Modell integriert. Bedingungen (3.8) begrenzen den SOC der Batterie auf die maximale Batteriekapazität r^q . Die Kopplung zwischen dem Graph des Straßensystems und den Graphen der Fahrzeuge erfolgt in den Nebenbedingungen (3.9). Durch das Koppeln von y_i^{Charge} und y_i^{Swap} an x_{pi}^q kann ein Fahrzeug nur über einen Knoten i fahren, wenn an diesem auch eine Ladestation oder Batteriewechselstation errichtet wird. Nebenbedingungen (3.10) beschränken das Modell insofern, dass an einem Knoten i entweder eine Ladestation oder eine Batteriewechselstation gebaut werden kann. Dadurch kann für die nachfolgenden Nebenbedingungen, welche den Ladevorgang abbilden, die Komplexität reduziert werden. Bedingungen (3.11) bis (3.16) definieren die ladbare Energiemenge l_p^q unter Berücksichtigung des Vorhandenseins einer Ladestation bzw. einer Batteriewechselstation sowie der zur Verfügung stehenden Zeit. Wird von Wegpunkt p weder eine Ladestation bzw.

Batteriewechselstation angefahren, so setzen Bedingungen (3.11) die Lademenge auf null. Die Restriktionen (3.12) beschränken die geladene Energiemenge auf das Produkt aus Standzeit am Wegpunkt p und der Ladeleistung E^q für den Fall, dass über den Knoten i einer potentiellen Ladestation gefahren und dort auch eine Ladestation errichtet wird. Abschließend modellieren Nebenbedingungen (3.13) die Voraussetzung, dass ein Batteriewechsel nur erfolgen kann, wenn das Fahrzeug mit der notwendigen Technologie ausgestattet ist ($h^q = 1$). Die Ungleichungen (3.14) bis (3.16) definieren in ähnlicher Art und Weise Randbedingungen für das Aufladen im Depot. Dazu beschränken die Ungleichungen (3.14) die im Depot geladene Energiemenge auf null, falls an dem zum Depot gehörigen Knoten weder eine Ladestation, noch eine Batteriewechselstation errichtet wird. Für den Fall, dass im Depot keine Batteriewechselstation errichtet wird, begrenzen Bedingungen (3.15) die nachladbare Energiemenge auf das Produkt aus Ladeleistung und Standzeit im Depot. Dabei wird die Standzeit im Depot aus der Differenz der Fahrzeit und der Dauer eines Tages in Minuten bestimmt. Nebenbedingungen (3.16) modellieren die Voraussetzung, dass zum Durchführen eines Batteriewechsels im Depot, die notwendige Technologie im Fahrzeug installiert sein muss.

Bedingungen (3.17) definieren die Entscheidungsvariablen y_i^{Charge} sowie y_i^{Swap} , welche angeben, ob eine Ladestation bzw. Batteriewechselstation errichtet wird, als binär. Weiterhin werden in (3.18) die Entscheidungsvariablen der befahrenen Wegstrecken x_{pi}^q und in (3.19) die Entscheidungsvariablen h^q , die angeben, ob ein Fahrzeug mit Batteriewechseltechnologie ausgestattet ist, als binär definiert. In (3.20) werden die Variablen r^q , welche die variable Batteriekapazität der Fahrzeuge abbilden, als nicht-negative rationale Zahl mit den vorgegebenen Schranken $R_{\min/\max}^q$ definiert. Abschließend definieren Bedingungen (3.21) die Entscheidungsvariablen zur Beschreibung des Status der Fahrzeuge auf den Wegpunkten t_p^q , b_p^q und l_p^q als nicht-negative rationale Zahl.

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{i \in N} C^{\text{Charge}} y_i^{\text{Charge}} + C^{\text{Swap}} y_i^{\text{Swap}} \\ & + \sum_{q \in Q} C_q^{\text{Swappable}} h^q + C^{\text{Capacity}} r^q \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\sum_{i \in D_{pq}} x_{pi}^q = 1 \quad \forall q \in Q, \forall p \in P_q \setminus \{|P_q|\} \quad (3.2)$$

$$t_p^q + \sum_{i \in D_{p,q}} x_{p,i}^q T_{p,i}^q \leq t_{p+1}^q \quad \forall q \in Q, \forall p \in P_q \setminus \{|P_q|\} \quad (3.3)$$

$$t_p^q = S_p^q \quad \forall q \in Q, \forall p \in V_q \quad (3.4)$$

$$O_{(p,o)}^q \leq t_o^q - t_p^q - \sum_{n=p}^{o-1} \sum_{i \in D_{n,q}} x_{n,i}^q T_{n,i}^q \quad \forall q \in Q, \forall (p,o) \in W_q \quad (3.5)$$

$$b_p^q - \sum_{i \in D_{p,q}} x_{p,i}^q U_{p,i}^q + l_p^q = b_{p+1}^q \quad \forall q \in Q, \forall p \in P_q \setminus \{|P_q|\} \quad (3.6)$$

$$b_0^q = b_{|P_q|}^q + l_{|P_q|}^q \quad \forall q \in Q \quad (3.7)$$

$$b_p^q + l_p^q \leq r^q \quad \forall q \in Q, \forall p \in P_q \quad (3.8)$$

$$x_{p,i}^q \leq y_i^{\text{Charge}} + y_i^{\text{Swap}} \quad \forall q \in Q, \forall p \in P_q \setminus \{|P_q|\}, i \in D_{p,q} \setminus \{0\} \quad (3.9)$$

$$y_i^{\text{Charge}} + y_i^{\text{Swap}} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (3.10)$$

$$l_p^q \leq \text{bigM} \sum_{i \in D_{p,q} \setminus \{0\}} x_{p,i}^q \quad \forall q \in Q, \forall p \in P_q \setminus \{|P_q|\} \quad (3.11)$$

$$l_p^q \leq E^q \text{Duration}_p^q + \text{bigM} \left(2 - y_i^{\text{Charge}} - x_{p\,i}^q \right) \quad \forall q \in Q, \forall p \in P_q \setminus \{|P_q|\}, i \in D_{p\,q} \setminus \{0\} \quad (3.12)$$

$$\text{mit } \text{Duration}_p^q = t_{p+1}^q - t_p^q - \sum_{i \in D_{p\,q}} x_{p\,i}^q T_{p\,i}^q$$

$$l_p^q \leq \text{bigM} \left(2 - y_i^{\text{Swap}} - x_{p\,i}^q + h^q \right) \quad \forall q \in Q, \forall p \in P_q \setminus \{|P_q|\}, i \in D_{p\,q} \setminus \{0\} \quad (3.13)$$

$$l_{|P_q|}^q \leq \text{bigM} \left(y_{i=f(|P_q|,q)}^{\text{Charge}} + y_{i=f(|P_q|,q)}^{\text{Swap}} \right) \quad \forall q \in Q \quad (3.14)$$

$$l_{|P_q|}^q \leq \text{bigM} y_{i=f(|P_q|,q)}^{\text{Swap}} + E^q \left(t_0^q - t_{|P_q|}^q + 1440 \right) \quad \forall q \in Q \quad (3.15)$$

$$l_{|P_q|}^q \leq \text{bigM} \left(1 - y_{i=f(|P_q|,q)}^{\text{Swap}} + h^q \right) \quad \forall q \in Q \quad (3.16)$$

$$y_i^{\text{Charge}}, y_i^{\text{Swap}} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N \quad (3.17)$$

$$x_{p\,i}^q \in \{0,1\} \quad \forall q \in Q, \forall p \in P_q, i \in D_{p\,q} \quad (3.18)$$

$$h^q \in \{0,1\} \quad \forall q \in Q \quad (3.19)$$

$$R_{\min}^q \leq r^q \leq R_{\max}^q \quad \forall q \in Q \quad (3.20)$$

$$t_p^q, b_p^q, l_p^q \geq 0 \quad \forall q \in Q, \forall p \in P_q \quad (3.21)$$

Weiterhin wurde in Anlehnung an Schiffer u. Walther (2017)¹⁰² eine untere Schranke für die Anzahl der Ladestationen und Anzahl der Batteriewechselstationen zur Reduktion der Rechenzeit als Nebenbedingung getestet. Dazu wurde das Modell mit einer Beispielinstantz von drei Fahrzeugen im Solver Gurobi 8.0 gelöst und die so bestimmte Anzahl an Ladestationen und Batteriewechselstationen als untere Schranke für eine weitere Berechnung der ansonsten unveränderten Modellinstanz eingesetzt. Das Modell mit einer unteren Schranke für Ladestationen und Batteriewechselstationen benötigt zur Lösung das Dreifache an Simplex-Iterationen und 40 % mehr Rechenzeit. Deshalb wird die Einführung einer solchen unteren Schranke nicht weiter verfolgt.

¹⁰² Schiffer und Walther 2017, The electric location routing problem, S. 1002

4 Datengenerierung

In diesem Kapitel wird die Generierung der Eingangsdaten und Parameter für das in Kapitel 3 entwickelte Modell beschrieben. Ziel ist es somit, zunächst die Fahrrouten für Pflegedienste, Busse und Abfallsammelwagen zu generieren, sodass diese als Abfolge von Wegpunkten, Soll-Ankunftszeiten an den Wegpunkten sowie Wartezeiten an den Wegpunkten vorliegen. Anschließend werden an den Schnittpunkten der Fahrrouten potentielle Standorte für Ladestationen und Batteriewechselstationen generiert und mögliche Umwege von den Fahrrouten bestimmt. Alle in diesem Kapitel vorgestellten Schritte der Datenverarbeitung erfolgen, wenn nicht anders erwähnt, mit der Programmiersprache Python 2.7.

4.1 Preprocessing Pflegedienste

Das Preprocessing der Touren für Pflegedienste kann entsprechend Abbildung 4.1 in drei Schritte aufgeteilt werden. Im ersten Schritt, der Bedarfsgenerierung, werden an Hand von im Internet verfügbaren Daten die Standorte von Patienten und Pflegestationen, die Fahrzeiten zwischen Patienten und Pflegestationen sowie der zeitliche Pflegebedarf bestimmt. Im nächsten Schritt, der Tourenplanung, werden diese Daten in ein VRP-TW überführt und die Anzahl der benötigten Fahrzeuge minimiert. Im letzten Schritt wird das Ergebnis der Optimierung zur Generierung von potentiellen Standorten der Ladestationen in Wegkoordinaten, Fahrzeiten, Entfernungen, Ankunftszeiten und Standzeiten überführt und ausgewertet.

Laut der Aachener Zeitung nehmen etwa 2.000 Menschen im Kreis Heinsberg eine ambulante Pflege in Anspruch.¹⁰³ Genaue Adressen dieser Menschen sind aus Datenschutzgründen nicht erhältlich; sie würden vermutlich aber auch nicht zu einer Steigerung der Aussagekraft des Modells führen. Um die Touren der Pflegedienste dennoch bestimmen zu können, müssen demnach Annahmen über die geographische Verteilung der Patienten von ambulanten Pflegediensten getroffen werden. Als Grundlage dazu dienen die Grundfläche, die Koordinaten und der Typ aller Gebäude im Kreis Heinsberg. Die Vektordaten aller Gebäude sind durch Open Street Map (OSM) frei erhältlich und können mithilfe der Overpass API abgefragt werden. Overpass Anfrage V.1 zeigt eine solche Abfrage.

¹⁰³ Aachener Zeitung (Hg.) 15.11.2015, Kreis Heinsberg will „Modellkommune Pflege“ werden

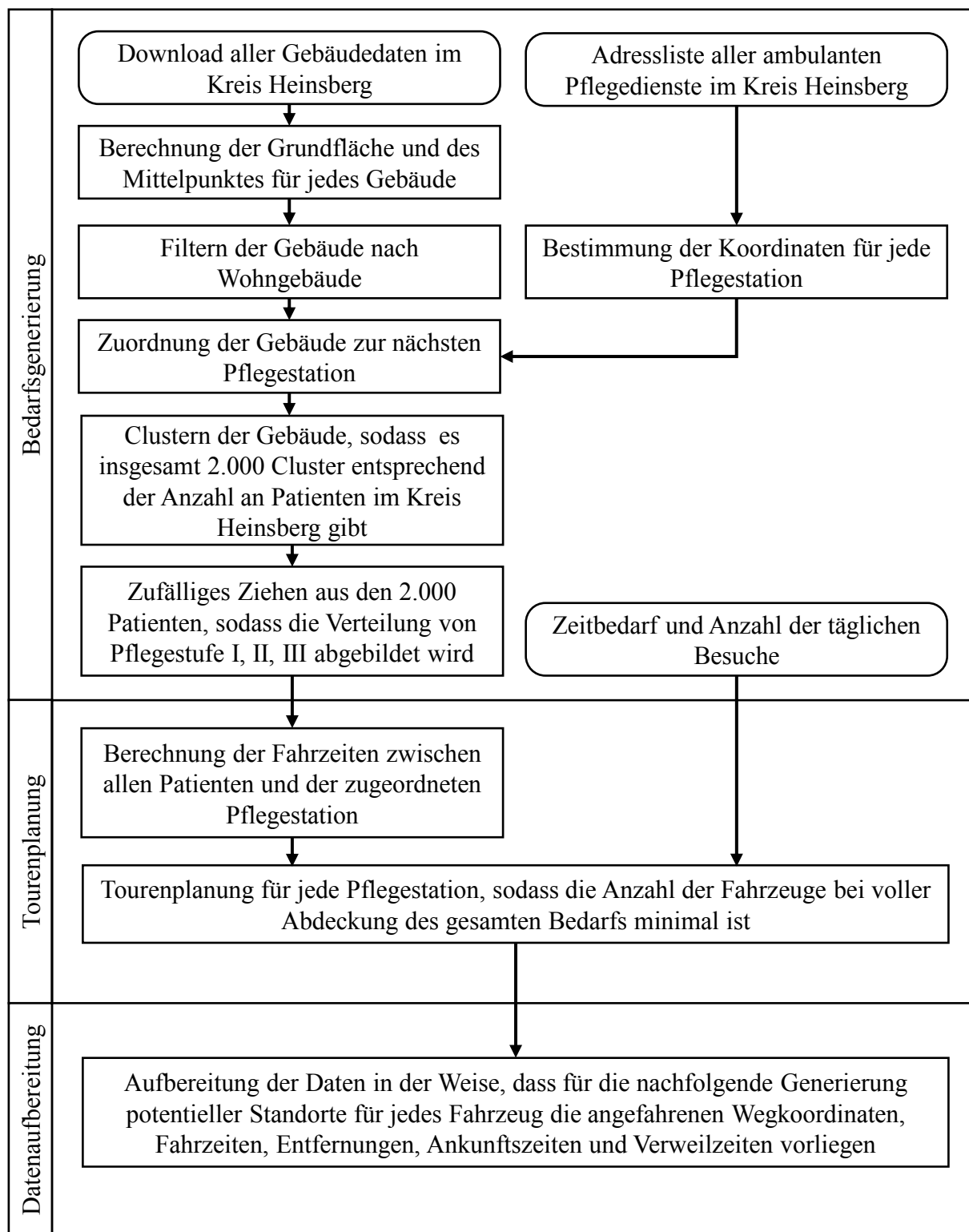


Abbildung 4.1: Ablauf Preprocessing Pflegedienste

Auf Basis dieser Vektordaten können die Grundfläche und die Koordinaten der Gebäude bestimmt werden. Da es sich bei der typischen Angabe von geographischen Koordinaten in Breiten und Längengraden um Winkelmaße handelt und diese sich somit nicht zur Bestimmung der

bebauten Fläche eignen, werden die Koordinaten zunächst in das UTM-Koordinatensystem umgerechnet. Dieses teilt die Erdoberfläche in vertikale Zonen auf und verebnet diese. Die UTM-Koordinaten stellen eine Angabe in Metern von den Rändern der vertikalen Zone dar. Da der Kreis Heinsberg genau auf der Grenze von zwei UTM-Zonen liegt, wird bei der Berechnung mit einem Offset im Längengrad von 3° gerechnet. Die eigentliche Flächenberechnung aus den UTM-Koordinaten erfolgt mithilfe der Gaußschen Trapezformel.

Anschließend kann aus den Metadaten von OSM der Typ jedes Gebäudes bestimmt werden. Somit können alle Wohngebäude identifiziert werden und diesen ein potentieller Pflegebedarf zugeordnet werden. Tabelle V.1 gibt einen Überblick über die Gebäudetypen und die Zuordnung von Pflegebedarf. Der Kreis Heinsberg stellt auf seiner Webseite eine Liste der Adressen aller Pflegedienste im Kreisgebiet zur Verfügung.¹⁰⁴ Aus diesen können die zugehörigen Geokoordinaten mittels einer Adresssuche bestimmt werden (vgl. Tabelle V.2).¹⁰⁵ Im nächsten Schritt werden alle Gebäude, welche einen potentiellen Pflegebedarf haben, der in Luftlinie nächstliegenden ambulanten Pflegestation zugeordnet. Um einen Pflegebedarf entsprechend der 2.000 Patienten in Ambulanter Pflege zu ermitteln, muss die Anzahl der Gebäude mit potentielltem Pflegebedarf reduziert werden. Dazu bietet sich ein Clustering mittels des k-Mean-Verfahrens an. Das k-Mean-Verfahren stellt ein Clustering-Verfahren dar, bei dem die Anzahl der Cluster vorgegeben werden kann. Eine Variante des k-Mean-Verfahrens, das gewichtete k-Mean-Verfahren, erlaubt es weiterhin beim Clustern der Gebäude die Grundfläche zu berücksichtigen. So kann berücksichtigt werden, dass tendenziell in größeren Gebäuden mehr Menschen leben. Da die Implementierung des gewichteten k-Mean-Verfahrens deutlich langsamer als das herkömmliche k-Mean-Verfahren ist und zudem im konkreten Anwendungsfall keine signifikanten Unterschiede bei den bestimmten Clustern zeigt, wird zum Clustern der Gebäude das herkömmliche k-Mean-Verfahren verwendet. Dazu wird zunächst die Anzahl von der Station betreuter Patienten aus dem Anteil der Station zugeordneter Gebäude an der Gesamtzahl aller Gebäude und aus der Gesamtzahl aller Patienten bestimmt. Anschließend werden mithilfe des k-Mean-Verfahrens die Gebäude, die der Pflegestation zugeordnet sind, entsprechend der Anzahl von der Station betreuter Patienten geclustert. Aus den so bestimmten Clustern wird jeweils der Mittelpunkt berechnet und dieser nachfolgend als Standort des Patienten verwendet. In Abbildung 4.2 werden die einer Station zugeordneten Gebäude und die daraus mithilfe des k-Mean-Verfahrens bestimmten Standorte der Patienten gezeigt. Weiterhin wird in Abbildung V.1 die Position aller Pflegestationen und Patienten in ambulanter Pflege im Kreis Heinsberg dargestellt.

¹⁰⁴ Kreis Heinsberg (Hg.) 08.01.2018, Ambulante Pflegedienste im Kreis Heinsberg

¹⁰⁵ Schneider 2018, GPS Visualizer's Easy Batch Geocoder

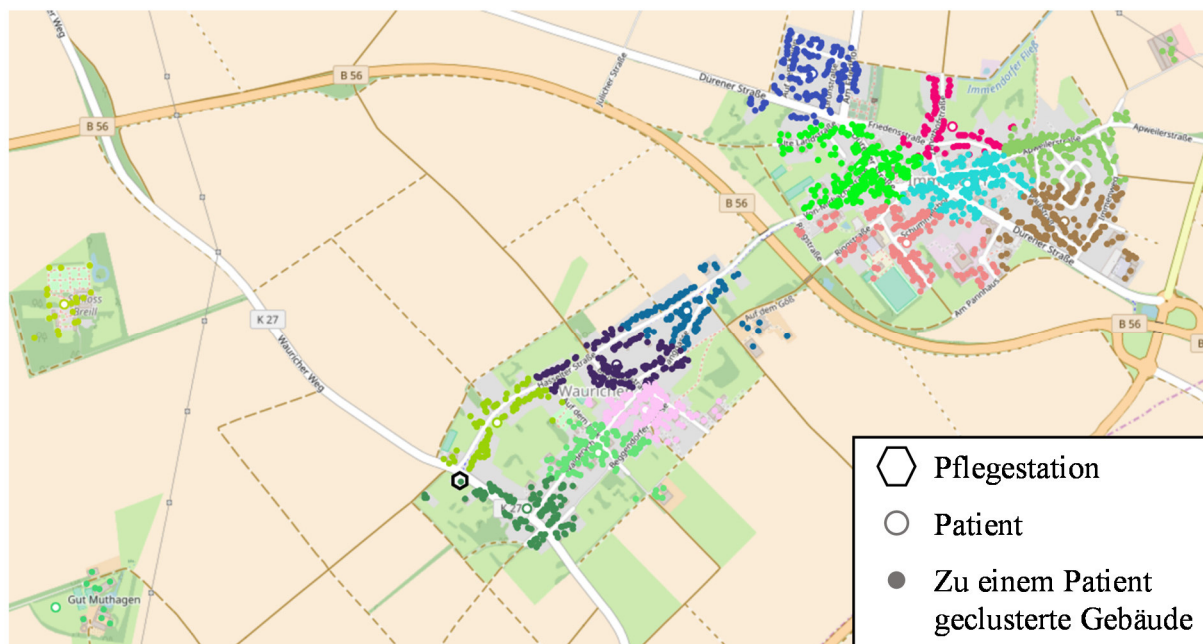


Abbildung 4.2: Clustering der Gebäude zu Patienten

Der zeitliche Pflegebedarf der Patienten hängt stark von der entsprechenden Pflegestufe ab. Laut Pflegestatistik 2015 des statistischen Bundesamtes sind in Nordrhein-Westfalen 59,7 % in Pflegestufe I, 30,9 % in Pflegestufe II und 9,4 % in Pflegestufe III einzuordnen.¹⁰⁶ Im nächsten Schritt des Preprocessings werden die Patienten zufällig entsprechend dieser Verteilung den drei Pflegestufen zugeordnet. Der durchschnittliche zeitliche Pflegebedarf beträgt laut DRK für Stufe I einmal täglich 90 min und bei Stufe II sind drei Besuche mit insgesamt durchschnittlich 3 h pro Tag anzusetzen. Der Zeitaufwand für Pflegestufe III beträgt 5 h pro Tag.¹⁰⁷ Eine Angabe über die Anzahl der Besuche bei Pflegestufe III wird nicht gemacht, deshalb wird diese mit fünf Besuchen pro Tag abgeschätzt.

Zur Tourenplanung für die Fahrzeuge der Pflegedienste werden ferner die Fahrzeiten zwischen den einzelnen Patienten und zwischen der Pflegestation und den Patienten benötigt. Die Fahrzeiten werden unter Verwendung der Open Source Routing Maschine berechnet (OSRM).¹⁰⁸ Die Open Source Routing Maschine ist eine Software-Bibliothek, welche mithilfe des Dijkstra-Algorithmus auf Basis von Open Street Map Daten den kürzesten Weg zwischen zwei Koordinatenpaaren für Kraftfahrzeuge bestimmt. Als Ergebnis werden die zu befahrenden Wegpunkte als Geokoordinaten und als OSM-Knoten-ID sowie die Fahrzeit auf Basis von Schätzungen der Durchschnittsgeschwindigkeiten ausgegeben.

¹⁰⁶ Statistisches Bundesamt (Hg.) 2017, Pflegestatistik 2015

¹⁰⁷ Deutsches Rotes Kreuz (Hg.), Pflegestufen

¹⁰⁸ Project OSRM (Hg.), Open Source Routing Machine

In Abschnitt 2.1.1 werden in der Literatur verwendete Modellierungsansätze zur Tourenplanung bei Pflegediensten vorgestellt. Auf Basis dieser wird in dieser Arbeit ein VRP-TW unter Berücksichtigung vereinfachter Annahmen modelliert. Dabei wird als Randbedingung vorgegeben, dass alle Besuche mit der pflegestufenabhängigen Besuchsdauer stattfinden müssen. Weiterhin wird bei Pflegestufe II vorgegeben, dass ein Mindestzeitabstand von 5 h zwischen den einzelnen Besuchen eingehalten werden muss. So wird eine gleichmäßige Verteilung der Besuche über den Tag sichergestellt. Für Pflegestufe III muss mindestens 3 h Abstand zwischen jedem der fünf Besuche sein. Es wird angenommen, dass jede Pflegestation im Zweischichtbetrieb mit einer Schichtlänge von 8 h arbeitet. Dazu starten die Fahrzeuge morgens von der Pflegestation, besuchen die Patienten, kehren nach spätestens 8 h zur Station zurück und rücken erneut für maximal 8 h zur Spätschicht aus. Die speziellen Einschränkungen von Elektrofahrzeugen, wie eine Begrenzung der Reichweite werden dabei nicht betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass Pflegedienste für die Einführung von BEVs nicht die Tourenplanung grundlegend abändern würden. Die Zielfunktion des VRP-TW zur Tourenplanung der Routen für Pflegedienste ist die Minimierung der eingesetzten Fahrzeuge. Bei einer Minimierung der eingesetzten Fahrzeuge wird die Fahrstrecke pro Fahrzeug, welche für die Ladeinfrastrukturplanung von besonderer Bedeutung ist, maximal und stellt somit eine Abschätzung zur sicheren Seite dar. Weiterhin werden die Patienten einer Station auf mehrere Modellinstanzen aufgeteilt, um somit die Größe der einzelnen Instanzen zu verkleinern und damit die benötigte Rechenzeit zu reduzieren. Die Modellformulierung und eine vollständige Beschreibung des Modells ist dem Anhang V.2 zu entnehmen.

In Abbildung V.2 wird das Ergebnis der Tourenplanung für die Pflegedienste im Kreis Heinsberg gezeigt. Die Fahrrouten der Fahrzeuge sind entsprechend der zugehörigen ambulanten Pflegestation eingefärbt. Es zeigt sich deutlich, dass durch die hohe Dichte an Pflegestationen und durch die Annahme, dass Patienten immer der nächsten Station zugeordnet sind, die Fahrrouten der einzelnen Stationen sich auf einen kleinen Umkreis um die Station selbst beschränken. Abbildung 4.3 stellt die Verteilung der Fahrdistanzen von Fahrzeugen im Einsatz für Pflegedienste dar. Die tägliche Fahrstrecke von 95 % der Fahrzeuge ist kürzer als 70 km. Nur jeweils ein Fahrzeug hat täglich eine Distanz von 100 – 110 km und 110 – 120 km zurückzulegen. Wird der e.GO Life mit einer maximalen Reichweite von 158 km als Referenzfahrzeug verwendet¹⁰⁹, so zeigt sich deutlich, dass die täglichen Fahrstrecken von Pflegediensten ohne Zwischenladen zurückgelegt werden können. Somit reicht ein Aufladen über Nacht im Depot aus. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass bei der gemeinschaftlichen Planung der Ladeinfrastruktur für die Fahrzeuge von Pflegediensten zusammen mit der Ladeinfrastruktur für die anderen Flotten im kommunalen Einsatz, außer durch die Mitbenutzung der Ladesäulen an den

¹⁰⁹ e.GO Mobile AG (Hg.), e.GO Life

Pflegestationen durch andere Fahrzeuge, keine Synergieeffekte bestehen können. Deshalb werden die Fahrzeuge von Pflegediensten bei der Implementierung des Modells in Kapitel 5 nicht weiter berücksichtigt.

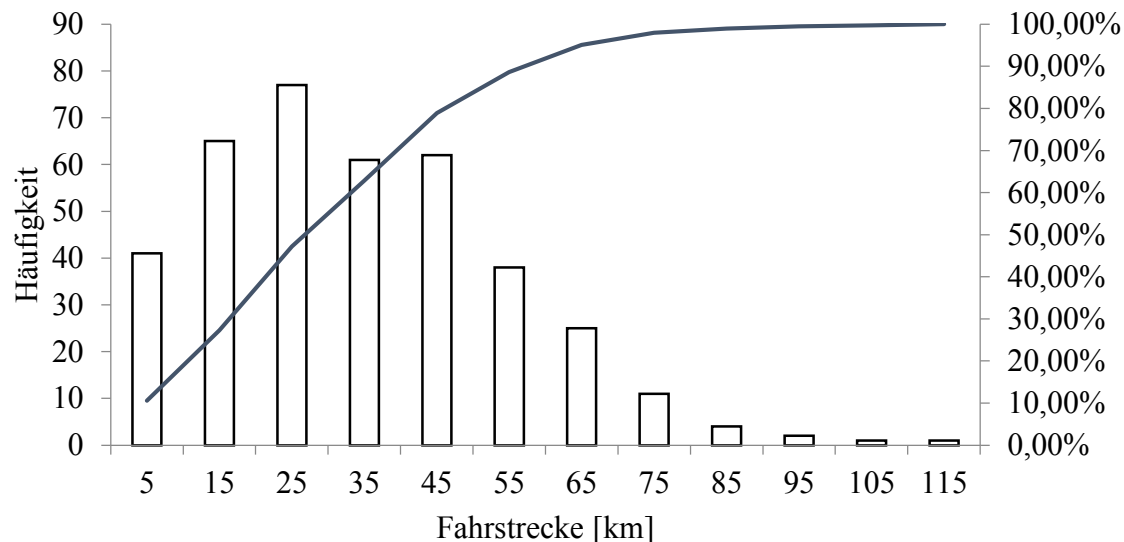


Abbildung 4.3: Länge der täglichen Fahrstrecken von Pflegediensten

4.2 Preprocessing Busse im ÖPNV

Das Preprocessing der Touren für die Busse im ÖPNV kann entsprechend Abbildung 4.4 in drei Schritte untergliedert werden. Der erste Schritt ist die Bedarfsgenerierung. Dabei wird bestimmt, welche Fahrgastfahrten im Kreis Heinsberg mit Bussen des jeweiligen Netzbetreibers bedient werden müssen. Im zweiten Schritt, der Tourenplanung, werden die Daten in ein Vehicle-Scheduling-Problem überführt und die Anzahl der benötigten Fahrzeuge zur Bedienung aller Fahrgastfahrten minimiert. Im letzten Schritt wird das Ergebnis der Optimierung zur Generierung von potentiellen Standorten der Ladestationen in Wegkoordinaten, Fahrzeiten, Entfernungen, Ankunftszeiten und Standzeiten überführt.

Der Aachener Verkehrsverbund (AVV) macht für das gesamte Verbundsgebiet, also auch für den Kreis Heinsberg, alle Fahrplandaten im Internet frei verfügbar.¹¹⁰ Diese beinhalten für alle Regionalbahnen und Busse im ÖPNV sämtliche Fahrgastfahrten sowie angefahrenen Haltestellen inklusive deren Geo-Koordinaten und Abfahrts- und Ankunftszeiten. Allerdings können den Daten keine Informationen über die Zuordnung einzelner Fahrgastfahrten zu Fahrzeugen und über Leerfahrten zwischen den Fahrgastfahrten (vgl. Abschnitt 2.1.2) entnommen werden. Zur Bestimmung der vollständigen Fahrzeugumläufe, welche für die Planung von Ladeinfrastruktur

¹¹⁰ Aachener Verkehrsverbund (Hg.) 10.07.2018, AVV OpenData

von Interesse sind, müssen dem entsprechend die Fahrgastfahrten Fahrzeugen zugeordnet werden und auf Basis von Annahmen die Leerfahrten zwischen den Fahrgastfahrten bestimmt werden.

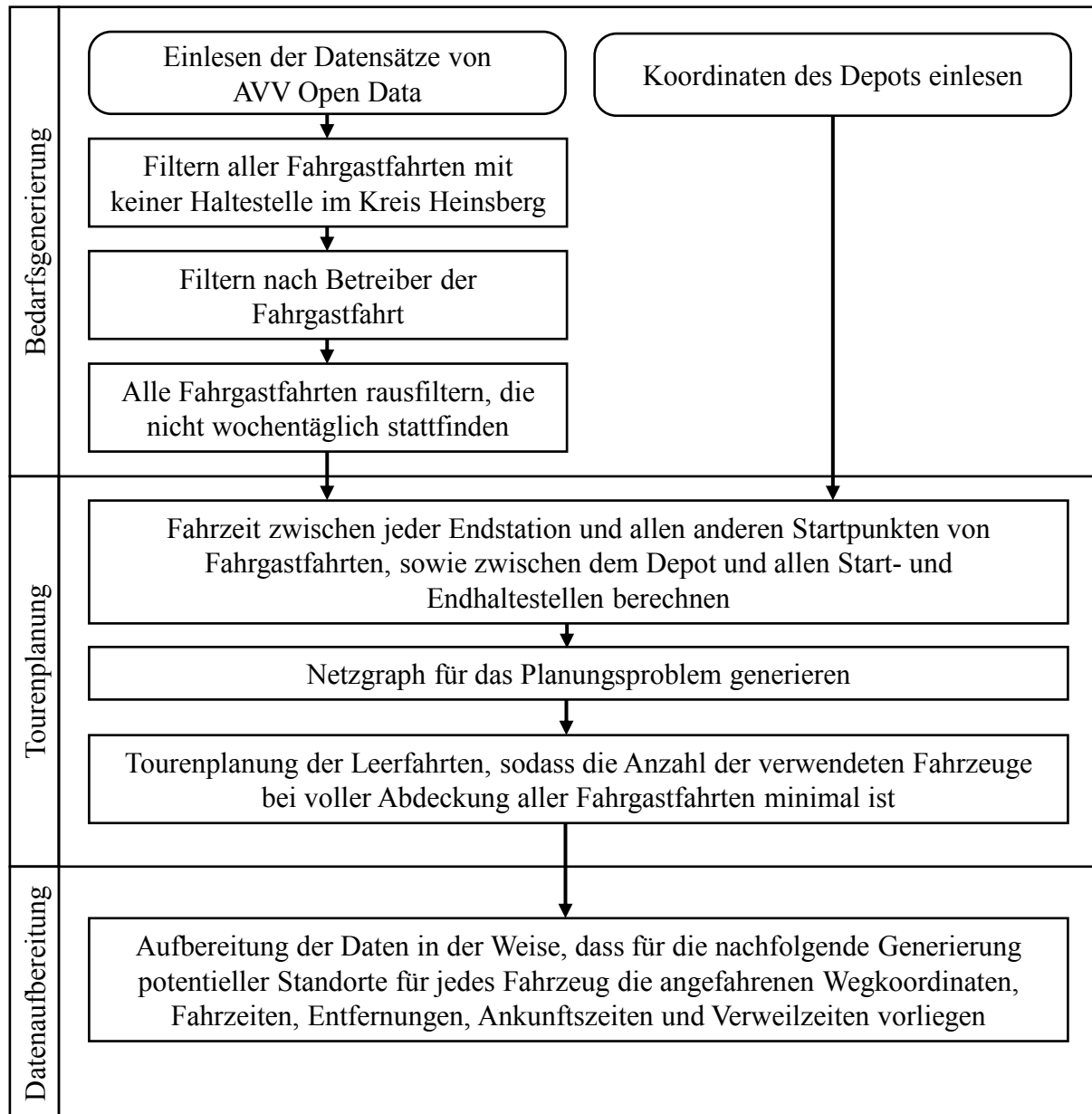


Abbildung 4.4: Ablauf Preprocessing Busse im ÖPNV

Aus den eingelesenen Fahrplandaten der AVV werden zunächst alle Fahrgastfahrten ohne Haltestelle im Kreis Heinsberg herausgefiltert. Dazu wird unter Verwendung der Overpass API von Open-Street-Map die Grenze des Kreises Heinsberg als Vektordaten heruntergeladen (s. Overpass Anfrage V.2). Mit diesen werden alle Haltestellen, welche innerhalb des Kreises Heinsberg liegen, bestimmt. Anschließend können alle Fahrgastfahrten, welche nicht mindestens eine der bestimmten Haltestellen anfahren, entfernt werden.

Der Datensatz der AVV beinhaltet neben den beiden Busbetreibern Westverkehr GmbH (844 Fahrgastfahrten wöchentlich) und Busverkehr Rheinland GmbH (415 Fahrgastfahrten wöchentlich) auch die Fahrten von zwei Regionalbahnbetreibern im Kreis Heinsberg. Diese müssen ebenfalls aus dem Datensatz entfernt werden, weil sie für die Planung von Ladeinfrastruktur nicht von Bedeutung sind. Da davon ausgegangen wird, dass die Westverkehr GmbH und die Busverkehr Rheinland GmbH den Umlauf ihrer Fahrzeuge unabhängig planen, werden alle nachfolgenden Schritte für die beiden Betreiber separat durchgeführt. Dazu wird jeweils beim Filtern der Regionalbahnen der andere nicht betrachtete Busbetreiber ebenfalls aus dem Datensatz entfernt.

Anschließend werden aus dem Datensatz alle Fahrgastfahrten, welche nicht wochentäglich befahren werden, entfernt. Dies geschieht unter der Annahme, dass in der Woche die Auslastung der Busflotten im ÖPNV deutlich höher ist als am Wochenende. Daraus folgt, dass in der Woche die Länge der Fahrzeugumläufe größer ist und damit auch die Anforderungen an die Planung von Ladeinfrastruktur steigen. Denn bei gleicher Batteriekapazität benötigt ein Fahrzeug mit einem kürzeren Fahrzeugumlauf vergleichsweise weniger Standzeit zum Aufladen bzw. weniger Batteriewechselvorgänge.

In Abbildung 4.5 wird der Netzgraph für eine Beispielinstantz des Vehicle-Scheduling Modells, welches zur Bestimmung der Fahrzeugumläufe in dieser Arbeit eingesetzt wird, dargestellt. Die Fahrgastfahrten sind dabei vollständig in Form von Start- und Endhaltestelle und der benötigten Fahrzeit in den Fahrplandaten der AVV gegeben. Die benötigte Fahrdauer der Leerfahrten zwischen den Fahrgastfahrten und zwischen Depot und allen Start- und Endhaltestellen muss zunächst noch bestimmt werden. Dazu wird angenommen, dass alle Busse der Westverkehr GmbH aus dem Depot in Geilenkirchen¹¹¹ starten und alle Fahrgastfahrten der Busverkehr Rheinland GmbH vom Betriebshof der ASEAG in Aachen¹¹² bedient werden (s. Tabelle V.4). Die Bestimmung der Fahrzeiten selbst geschieht mit der Open Source Routing Maschine (vgl. Abschnitt 4.1). Anschließend kann der Netzgraph für das Planungsproblem generiert werden. Dabei kann vom Depot-Knoten ausgehend jede Starthaltestelle angefahren werden. Weiterhin besteht von jeder Endhaltestelle eine Verbindung zu den Starthaltestellen aller anderen Fahrgastfahrten und zum Depot. Weiterhin wird für jeden Knoten im Graphen die Menge eingehender und ausgehender Kanten bestimmt.

¹¹¹ WestVerkehr GmbH (Hg.) 2015, Wir über uns

¹¹² Busverkehr Rheinland GmbH (Hg.), Unternehmen - DB Rheinlandbus; Busverkehr Rheinland GmbH (Hg.), Unsere Verkaufsstellen

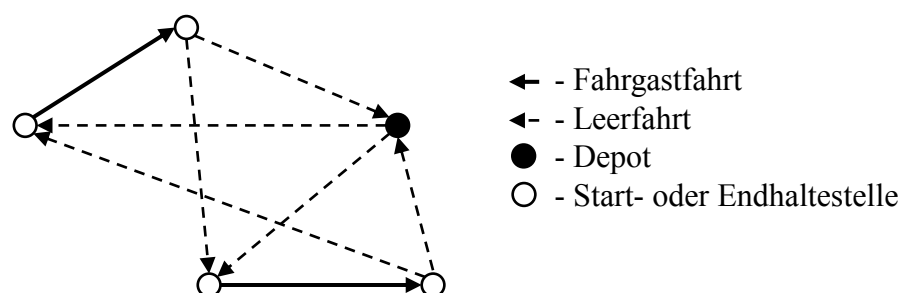


Abbildung 4.5: Beispielnetzgraph des Vehicle-Scheduling-Modells

Auf Basis des Graphen und der Fahrzeiten können die Fahrzeugumläufe mit Hilfe eines Vehicle-Scheduling Modells bestimmt werden. Dazu wird angenommen, dass jeder Fahrzeugumlauf im Depot des jeweiligen Betreibers beginnt und auch dort wieder endet. Weiterhin werden die Abfahrtszeiten der einzelnen Fahrgastfahrten berücksichtigt. Es wird die Annahme getroffen, dass, anders als die Fahrzeuge der Pflegedienste, die Busse nicht an Schichtwechsel gebunden sind, da der Fahrerwechsel theoretisch an jeder beliebigen Bushaltestelle stattfinden kann. Die spezifischen Eigenschaften von BEVs, wie beschränkte Batteriekapazität, finden bei der Bestimmung der Fahrzeugumläufe keine Berücksichtigung, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Busflottenbetreiber für die Einführung von BEVs die Umlaufplanung grundlegend abändern würden. Das zur Bestimmung der Fahrzeugumläufe verwendete Vehicle Scheduling Modell minimiert die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge bei vollständiger Abdeckung aller Fahrgastfahrten des jeweiligen Netzbetreibers. Durch die Minimierung der Fahrzeuganzahl wird die gefahrene Strecke pro Fahrzeug maximal. Bei der nachfolgenden Planung der Ladeinfrastruktur sind solche Fahrzeuge mit einer im Vergleich zur Batteriekapazität des Fahrzeugs großen Fahrstrecke am kritischsten. Somit stellt eine Minimierung der benötigten Fahrzeuge eine Abschätzung zur sicheren Seite dar. Ferner wird durch die Minimierung der Fahrzeugzahl unter Vernachlässigung von Personalkosten die wirtschaftlichste Umlaufplanung angenähert. Die vollständige Formulierung des Vehicle-Scheduling-Modells zur Bestimmung der Fahrzeugumläufe im ÖPNV kann Anhang V.4 entnommen werden.

In Abbildung V.3 werden die nach der beschriebenen Methode bestimmten Fahrrouten der Westverkehr GmbH dargestellt. Das Ergebnis der Tourenplanung für die Busse der Busverkehr Rheinland GmbH kann Abbildung V.4 entnommen werden. Abschließend wird das Ergebnis der Umlaufplanung zur Generierung von potentiellen Standorten der Ladestationen (s. Abschnitt 4.4) und zur anschließenden Ladeinfrastrukturplanung (s. Kapitel 5) in Wegkoordinaten, Fahrzeiten, Entfernungen, Ankunftszeiten und Standzeiten überführt.

4.3 Preprocessing Abfallsammelwagen

Das Ziel des Preprocessing der Abfallsammelwagen ist, die Fahrrouten der Abfallsammelwagen zu bestimmen. Das Preprocessing kann entsprechend Abbildung 4.6 in drei Schritte aufgeteilt werden. Im ersten Schritt der Bedarfsgenerierung werden an Hand von im Internet verfügbaren Daten die Koordinaten von Standorten bestimmt, an denen Abfall abgeholt werden muss. Im nächsten Schritt der Tourenplanung werden diese Daten in ein Capacitated-VRP-TW (CVRP-TW) übergeben und die Anzahl der benötigten Fahrzeuge minimiert. Im letzten Schritt wird das Ergebnis der Optimierung zur Generierung von potentiellen Standorten der Ladestationen in Wegkoordinaten, Fahrzeiten, Entfernungen, Ankunftszeiten und Standzeiten überführt.

Laut Siedlungsabfallbilanz des Kreises Heinsberg lag die im Jahr 2016 sowohl von Haushalten als auch vom Gewerbe produzierte Abfallmenge, welche durch Abfallsammelwagen abgeholt wurde, bei 116.039 t.¹¹³ Das entspricht einer wöchentlichen Abfallmenge von 2.213,5 t. Eine genauere Untergliederung nach Abfallarten wird nachfolgend vereinfachend nicht betrachtet. Für die Tourenplanung der Abfallsammelwagen ist die räumliche Verteilung der Abfallmenge von besonderer Bedeutung. Da genauere Informationen zur räumlichen Verteilung des Abfalls nicht zur Verfügung stehen, wird die räumliche Verteilung durch eine Umlegung der Abfallmenge auf Basis der Grundflächen der Gebäude im Kreis Heinsberg abgeschätzt. Dazu werden zunächst entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 4.1 die Grundflächen, die Koordinaten und der Gebäudetyp aller Gebäude auf Basis von Open-Street-Map-Daten bestimmt. Tabelle V.1 gibt die Gebäudetypen an, für die eine anfallende Abfallmenge angenommen wird. Anschließend kann die Abfallmenge von 2.213,5 t entsprechend der Grundflächen der Gebäude umgelegt werden.

¹¹³ Kreis Heinsberg (Hg.) 2016, Siedlungsabfallbilanz im Kreis Heinsberg

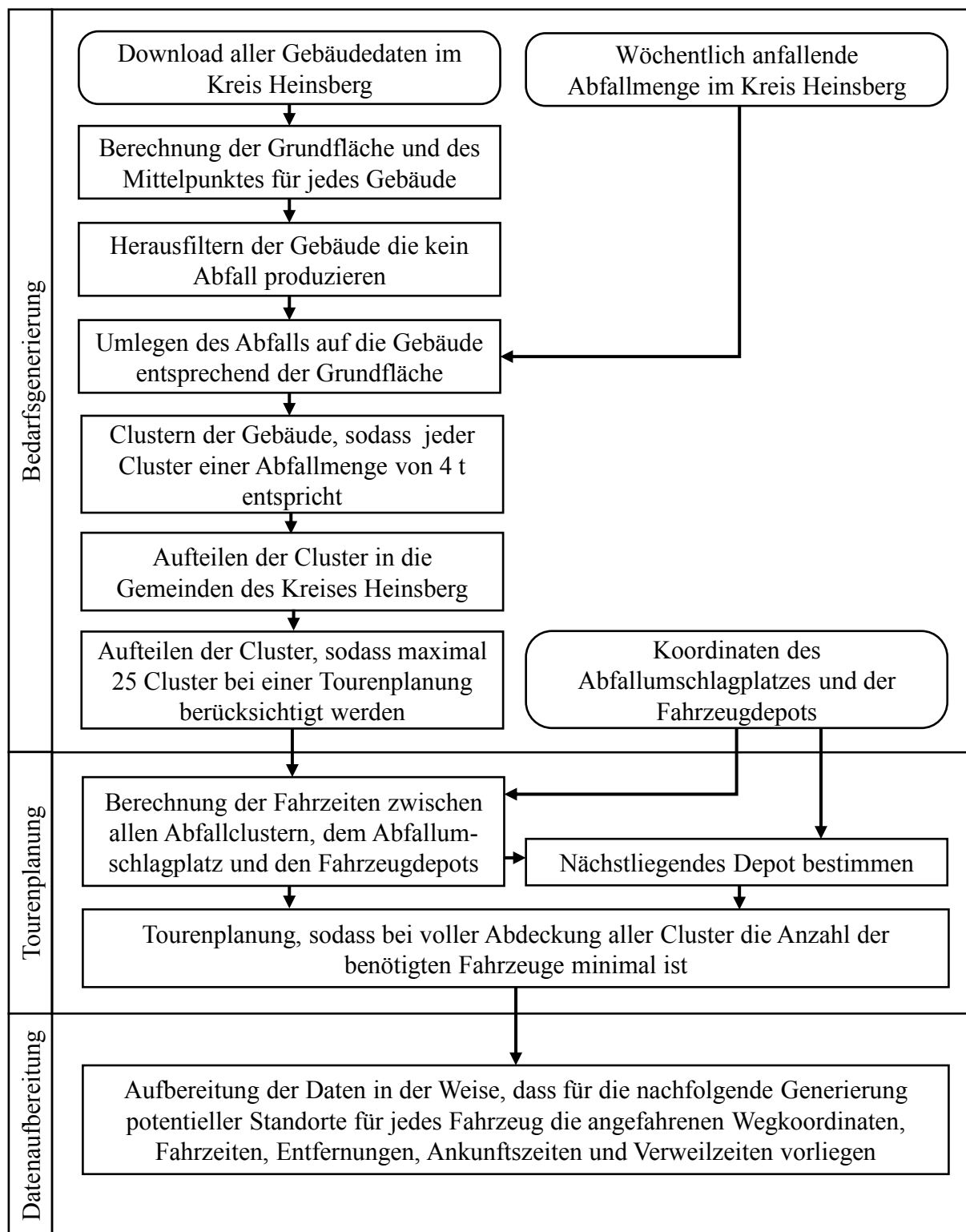


Abbildung 4.6: Ablauf Preprocessing Abfallsammelwagen

Da eine Tourenplanung der Abfallsammelwagen, welche das Anfahren jedes einzelnen Gebäudes berücksichtigt, die Rechenkapazitäten moderner Computer bei weitem übersteigen würde, wird nachfolgend die Anzahl der anzufahrenden Standorte, an denen Abfall abgeholt werden

muss, reduziert. Dazu werden zunächst, gemäß Pseudocode 4.1, nah beieinander liegende Gebäude zu Clustern mit einer maximalen Abfallmenge entsprechend der halben Transportkapazität eines Abfallsammelwagens zusammengeführt. Dadurch ergeben sich Touren, welche aus Sammelfahrten zwischen den Clustern und umrandenden Abtransportfahrten bestehen. In Abbildung 4.7 wird die so bestimmte Zuordnung einzelner Gebäude zu einem Cluster gezeigt. In Abbildung V.5 wird die räumliche Verteilung aller Abfallcluster im Kreis Heinsberg dargestellt. Um die Größe der einzelnen Modellinstanzen der Tourenplanung weiter zu reduzieren, werden die Abfallcluster in die Gemeinden des Kreises Heinsberg aufgeteilt und in den Gemeinden weiter untergliedert, sodass maximal 25 Cluster einer Modellinstanz zugeordnet sind. Dieses Vorgehen entspricht für die größten Gemeinden einer Vierteilung der Modellinstanz. Bei einer Berücksichtigung unterschiedlicher Abfallarten müssten auch mehrere separate Tourenplanungen für jede Gemeinde erfolgen. Die Plausibilität für ein solches Vorgehen ist daher gegeben.

Pseudocode 4.1: Clustering des Abfallbedarfs

Input: A: Abfallknoten, m: Abfallmenge, k: Abfallkoordinaten

Output: C: Abfallcluster, $\underline{m}$: Clusterabfallmenge, $\underline{k}$: Clusterkoordinaten

```

1:  i ← getRandomItem(A)
2:  while A.length > 0 then
3:      A.pop(i)
4:      j ← getNearestElement(A, i)
5:      m[j] ← m[j] + m[i]
6:      k[j] ← (k[j] * m[j] + k[i] * m[i]) / (m[j] + m[i])
7:      i ← j
8:      if m[i] > 4 then
9:          C.add(i)
10:          $\underline{m}[i] \leftarrow m[j]$ 
11:          $\underline{k}[i] \leftarrow k[j]$ 
12:         A.pop(i)
13:         i ← getRandomItem(A)

```

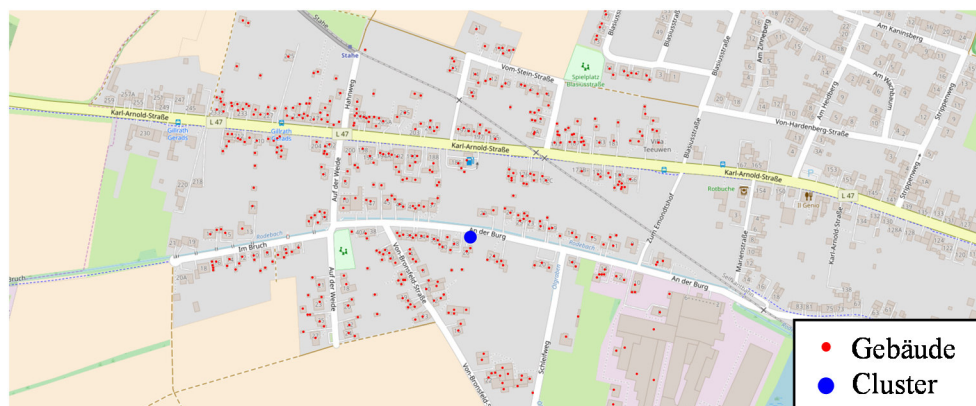


Abbildung 4.7: Zuordnung einzelner Gebäude zu Clustern

Laut Abfallkalender des Kreises Heinsberg ist die Schoenmackers GmbH der Entsorgungsdienstleister für den Kreis Heinsberg.¹¹⁴ Die Webseite der Schoenmackers GmbH zeigt, dass nicht allen, aber den meisten Gemeinden des Kreises Heinsberg die Schoenmackers GmbH als Entsorgungsdienstleister zugeordnet ist.¹¹⁵ Vereinfachend wird angenommen, dass die Schön-mackers GmbH der einzige Entsorgungsdienstleister im Kreis Heinsberg ist. Die Schoen-mackers GmbH betreibt innerhalb des Kreises Heinsberg ein Depot in Wassenberg, ein Depot in Geilenkirchen und ein Depot in Erkelenz.¹¹⁶ Im Kreis Heinsberg wird der Abfall von den Ab-fallsammelfahrzeugen nicht direkt zu einer Deponie oder in eine Müllverbrennungsanlage ver-bracht, sondern in Gangelt umgeschlagen.¹¹⁷

Zur Tourenplanung der Abfallsammelfahrzeuge werden die Fahrzeiten zwischen den einzelnen Abfallclustern, dem Depot und dem Abfallumschlagplatz benötigt. Diese werden mit Hilfe der Open Source Routing Maschine bestimmt (vgl. Abschnitt 4.1). Um den Zeitbedarf des Einsam-melns zu berücksichtigen, wird für alle Strecken zu einem Abfallcluster die Sammelzeit (s. Ta-belle 4.1) auf die Fahrzeit aufgeschlagen. In gleicher Weise werden auf alle Strecken zum Ab-fallumschlagplatz die Entladezeit (s. Tabelle 4.1) auf die Fahrzeit aufgeschlagen.

In Abschnitt 2.1.3 wird ein Überblick über aktuelle Planungsansätze bei der Tourenplanung für Abfallsammelwagen gegeben. Dabei stellen Multi-Depot-Vehicle-Routing-Probleme (MD-VRP) den Stand der Technik dar. Da eine testweise Implementierung eines MD-VRP zu wei-

¹¹⁴ Stadtverwaltung Heinsberg (Hg.) 2017, Abfallkalender Heinsberg 2017

¹¹⁵ Schön-mackers GmbH (Hg.) 2018, Abfallkalender

¹¹⁶ Schön-mackers GmbH (Hg.), Standorte-Schön-mackers in NRW

¹¹⁷ Kreis Heinsberg (Hg.), Abfall-Entsorgungsanlagen im Kreis Heinsberg

teren Einschränkungen in der Größe der Modellinstanz führte, wird zur Tourenplanung der Abfallsammelwagen nur ein Depot berücksichtigt. Dazu wird vor der Tourenplanung das zu den Abfallclustern der Modellinstanz nächstliegende Depot ausgewählt.

Tabelle 4.1: Sammelzeit und Entladezeit der Abfallsammelwagen

	Angaben aus Quelle ¹¹⁸	Verwendete Angaben
Lademenge	14,89 t	-
Anzahl der Touren	3	-
Netto-Sammelzeit	313 min	21,0 min/t
Entladezeit	14 min	4,7 min/Tour
Pausenzeit	44 min	44 min

In dieser Arbeit wird zur Tourenplanung der Abfallsammelwagen ein CVRP-TW unter Berücksichtigung vereinfachter Annahmen modelliert. Dabei wird als Randbedingung vorgegeben, dass jeder Abfallcluster von einem Abfallsammelwagen angefahren werden muss. Bei elektrisch betriebenen Abfallsammelwagen hängt die Transportkapazität stark von der Batteriekapazität ab. Für einen gesamten Arbeitstag wären vier Tonnen Batterien notwendig, was die Abfallkapazität von 10 t bei einem konventionell angetriebenen Abfallsammelwagen auf 6 t reduzieren würde.¹¹⁹ Da in dem in dieser Arbeit verwendeten Modell zur Ladeinfrastrukturplanung die Batteriekapazität internalisiert ist und somit zum Zeitpunkt des Preprocessing nicht bekannt ist, wird eine mittlere Abfallkapazität von 8 t angenommen. Die Tourenplanung der Abfallsammelwagen erfolgt unter der Prämisse, dass BEVs als Abfallsammelwagen nur dann uneingeschränkt eingesetzt werden, wenn diese dieselben Betriebsabläufe wie konventionell angetriebene Sammelwagen zulassen. Deshalb finden die speziellen Einschränkungen von Elektrofahrzeugen, wie eine Begrenzung der Reichweite, keine Berücksichtigung bei der Tourenplanung. Weiterhin wird angenommen, dass jede Tour im Depot beginnt und auch dort wieder endet. Es wird vorgegeben, dass die Fahrzeuge bei der Rückkehr zum Depot vollständig entladen sein müssen. Um ein mehrfaches Anfahren des Abfallumschlagplatzes abbilden zu können, wird der Knoten des Abfallsammelplatzes mehrfach in den Graphen des CVRP-TW aufgenommen. Des Weiteren wird eine Arbeitszeit von 8 h angenommen, sodass alle Fahrzeuge

¹¹⁸ Toth Februar 2007, Kennzahlen zur Unterstützung der Planung und Optimierung der Entsorgungslogistik, S. 142

¹¹⁹ Schmidt 24.05.2018, FES testet ab Sommer dieselfreies Müllauto

spätestens 8 h nach dem Ausrücken wieder im Depot angekommen sein müssen. Die Zielfunktion des CVRP-TW zur Tourenplanung der Abfallsammelwagen ist die Minimierung der eingesetzten Fahrzeuge. Bei einer Minimierung der eingesetzten Fahrzeuge wird die Fahrstrecke pro Fahrzeug, welche für die Ladeinfrastrukturplanung von besonderer Bedeutung ist, maximal und stellt somit eine Abschätzung zur sicheren Seite dar. Die Modellformulierung und eine vollständige Beschreibung des Modells ist dem Anhang V.6 zu entnehmen.

Abschließend wird das Ergebnis der Umlaufplanung zur Generierung von potentiellen Standorten der Ladestationen (s. Abschnitt 4.4) und zur anschließenden Ladeinfrastrukturplanung (s. Kapitel 5) in Wegkoordinaten, Fahrzeiten, Entfernungen, Ankunftszeiten und Standzeiten überführt. Dabei werden als Standzeiten die Entladezeiten beim Abfallumschlagplatz vorgegeben. Weiterhin wird die Ankunftszeit am Depot so festgelegt, dass eine Pausenzeit von 44 min (s. Tabelle 4.1) mit berücksichtigt wird.

4.4 Generierung potentieller Standorte der Ladeinfrastruktur

Die Planung von Ladeinfrastruktur mit dem in dieser Arbeit entwickelten DFRLM-TW-VBC erfordert neben den Graphen der Fahrzeuge auch einen Graph des Straßensystems, welcher als Knoten potentielle Standorte von Ladeinfrastruktur und als Kanten die Fahrrouten der Fahrzeuge beinhaltet. Der Ablauf der Generierung potentieller Standorte der Ladeinfrastruktur und der Überführung dieser in den Graph des Straßensystems wird in Abbildung 4.8 dargestellt.

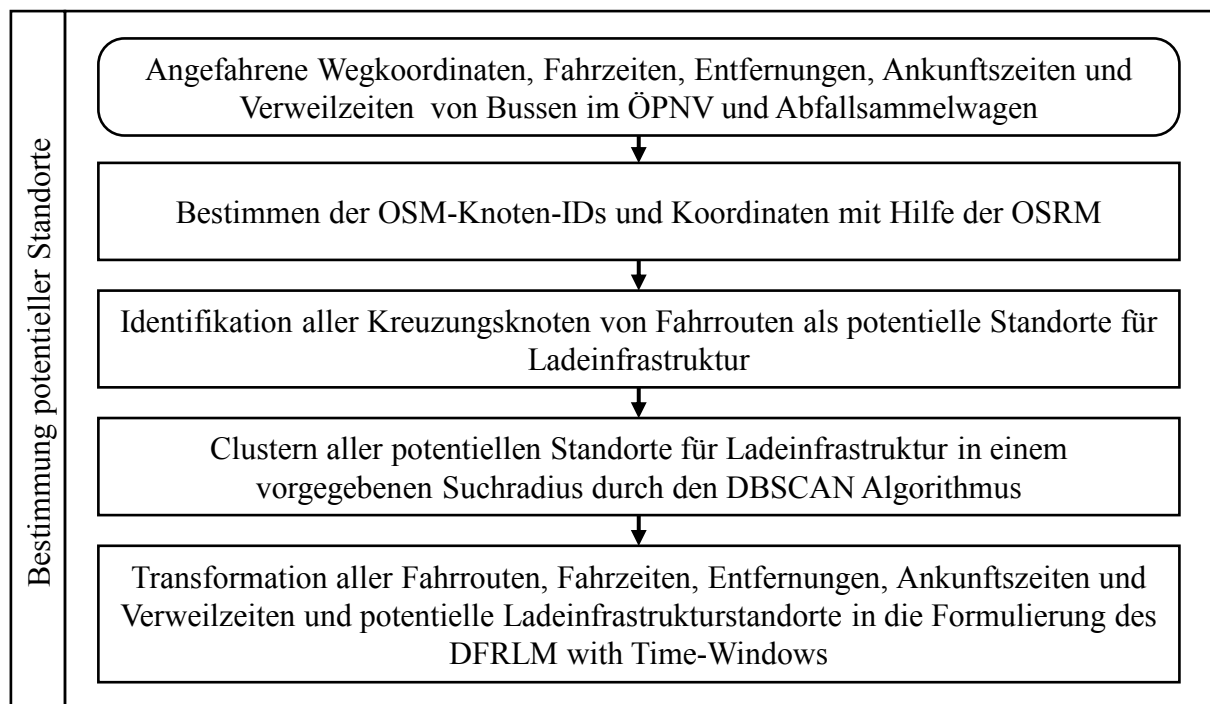


Abbildung 4.8: Ablauf der Generierung potentieller Ladeinfrastrukturstandorte

Im Open-Street-Map-Datensatz, welcher die Grundlage für jede grafische Kartenansicht von OSM darstellt, werden Straßen als geordnete Liste von OSM-Knoten gespeichert (vgl. Abbildung 4.9). Jeder dieser Knoten besitzt eine OSM-Knoten-ID, mittels der er eindeutig identifiziert werden kann. Im ersten Schritt der Generierung potentieller Ladeinfrastrukturstandorte werden für die in den Abschnitten 4.2 und 4.3 generierten Fahrrouten der Busse im ÖPNV und der Abfallsammelwagen die Open-Street-Map-Knoten-IDs und Koordinaten mit Hilfe der OSRM bestimmt. Diese werden im nächsten Schritt verwendet, um die Kreuzungsknoten aller Fahrrouten zu extrahieren. Kreuzungsknoten können sowohl Knoten sein, an denen sich die Fahrrouten der Fahrzeuge schneiden oder an denen die Fahrrouten zweier Fahrzeuge zusammenkommen bzw. sich auftrennen (vgl. Abbildung 4.9). An den so bestimmten Kreuzungsknoten passiert mindestens eine Fahrroute mehr den Knoten als an einem der Nachbarknoten. Sie stellen somit lokale Maxima hoher Fahrzeugdichte dar und werden deshalb als potentielle Standorte der Ladeinfrastruktur verwendet. Da für das untersuchte Gebiet des Kreises Heinsberg und die generierten Fahrrouten der Busse und Abfallsammelwagen eine sehr hohe Anzahl potentieller Standorte bestimmt werden, werden die potentiellen Standorte im nächsten Schritt geclustert. Zum Clustern wird ein DBSCAN Algorithmus verwendet. Diesem wird ein Cluster-Radius, in dem alle Kreuzungsknoten zu einem potentiellen Ladeinfrastrukturstandort zusammengefasst werden, übergeben. Dabei wird die Annahme getroffen, dass eine Ladestation im Mittelpunkt der geclusterten Kreuzungsknoten alle Fahrzeuge, welche einen der Kreuzungsknoten passieren, mit Energie versorgen kann (vgl. Abbildung 4.9). Im letzten Schritt der Standortgenerierung werden bei den Fahrrouten der Fahrzeuge Wegpunkte an den potentiellen Ladeinfrastrukturstandorten hinzugefügt und alle Wegpunkte zwischen zwei potentiellen Ladeinfrastrukturstandorten entfernt. Die in Abschnitt 4.2 und 4.3 bestimmten Entfernungen, Fahrzeiten, Ankunftszeiten und Mindestverweilzeiten werden ebenfalls an die transformierten Wege der Fahrzeuge angepasst. Die transformierten Wege entsprechen somit der in Abbildung 3.3 dargestellten Formulierung für den Graph der Fahrzeuge.

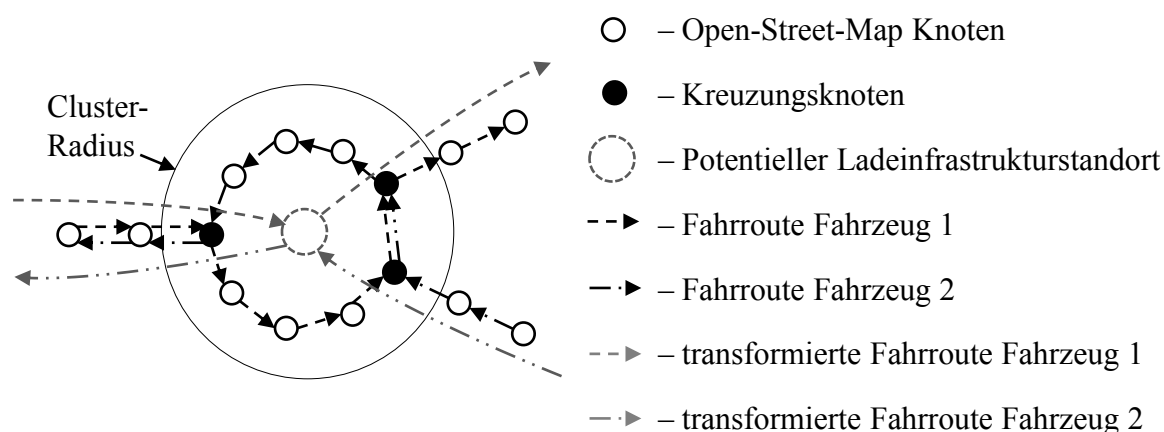


Abbildung 4.9: Beispiel Generierung eines potentiellen Ladeinfrastrukturstandorts

4.5 Generierung von Umwegen

Das in Kapitel 3 formulierte DFRLM-TW-VBC sieht die Möglichkeit vor, dass Fahrzeuge Abweichend von der direkten Fahrtrouten einen Umweg fahren können. Dies ermöglicht den Fahrzeugen Ladeinfrastruktur abseits der eigenen Fahrtroute mit zu nutzen, sofern es die zeitlichen Restriktionen erlauben. Durch die Mehrfachnutzung besteht daher ein erhöhtes Einsparpotential.

In Abbildung 4.10 wird der Ablauf der Generierung der Umwege beschrieben. Die Generierung von Umwegen erfolgt für alle Leerfahrten der Busse und Depot- sowie Deponiefahrten der Abfallsammelwagen. Denn eine Bestimmung von Umwegen für Fahrgastfahrten der Busse oder Sammelfahrten der Abfallsammelwagen würde die spezifischen Charakteristika der Einsatzfahrten nicht berücksichtigen. Im ersten Schritt der Generierung von Umwegen wird für die zu berücksichtigenden Wege der Fahrzeuge die Distanz in Luftlinie zwischen den beiden Wegpunkten des jeweiligen Weges bestimmt. Anschließend werden alle Umwege über potentielle Ladeinfrastrukturstandorte, welche eine Verlängerung von maximal 33 % zum ursprünglichen Weg bedeuten würden, zum Graph des jeweiligen Fahrzeugs hinzugefügt. Im zweiten Schritt werden für alle neu hinzugefügten Umwege die exakten Entfernungen und Fahrdauern mit Hilfe der OSRM bestimmt. Mit diesen kann im letzten Schritt die Zulässigkeit der Umwege in Bezug auf die vorgegebenen zeitlichen Restriktionen überprüft werden. Dazu wird für jedes Fahrzeug und für jeden möglichen Umweg des Fahrzeugs eine Instanz des DFRLM-TW-VBC aufgestellt. In dieser wird die Variable, die angibt, dass der Umweg gefahren wird per Nebenbedingung auf eins gesetzt und die Lösbarkeit überprüft. Wird das Modell durch das Vorgeben der Fahrt über den Umweg unlösbar, wird der Umweg wieder aus dem Graph des jeweiligen Fahrzeugs entfernt.

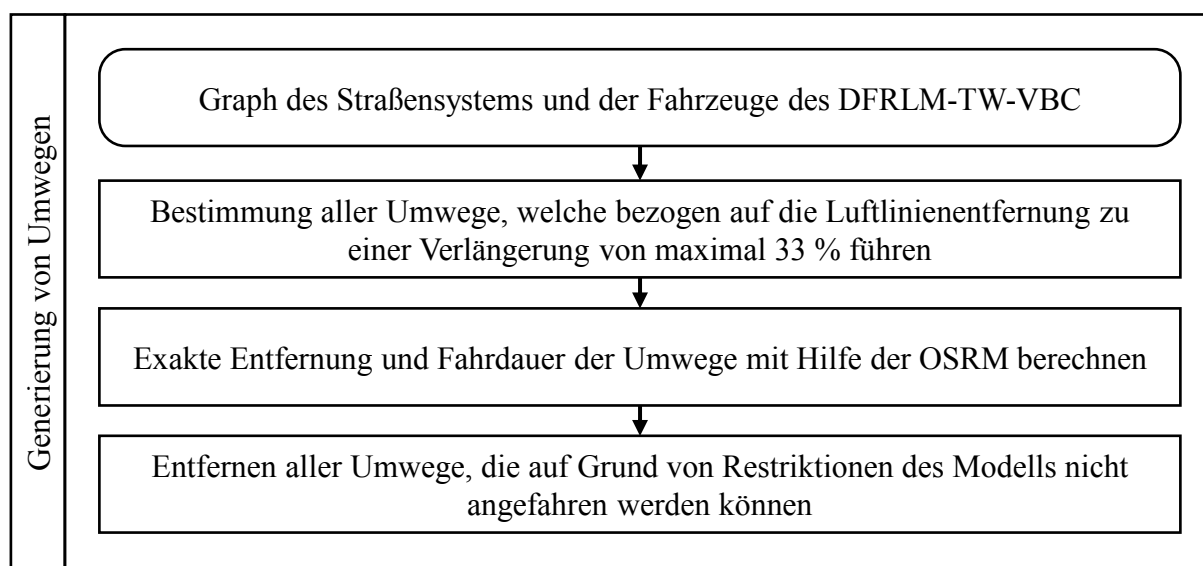


Abbildung 4.10: Ablauf der Generierung von Umwegen

5 Implementierung des Modells

In diesem Kapitel werden zunächst die notwendigen Parameter definiert, welche zur Implementierung des in Kapitel 3 vorgestellten Modells benötigt werden. Anschließend wird das Modell mit den in Kapitel 4 generierten Tourendaten berechnet und die durch eine gemeinsame Planung erzielbaren Synergieeffekte ausgewertet. Abschließend erfolgt eine Untersuchung der Sensitivität der einzelnen Parameter auf das Optimierungsergebnis.

5.1 Verwendete Parameter

Tabelle 5.1 gibt ein Überblick über die zur Implementierung des Modells verwendeten Parameter der beiden Fahrzeugtypen Busse und Abfallsammelwagen. Angaben über die Ausstattungskosten der Fahrzeuge, um Batteriewechsel durchführen zu können, sind nicht öffentlich verfügbar. Der Vergleich der Preise zweier Fahrzeuge derselben Klasse, dem Nissan Leaf¹²⁰ ohne Batteriewechseltechnologie und dem Renault Fluence Z.E.¹²¹ mit Batteriewechseltechnologie zeigt, dass die Kosten maximal in einem niedrigen dreistelligen Bereich liegen können. Es wird angenommen, dass der technologische Aufwand, um diese Technologie bei Nutzkraftfahrzeugen zu implementieren, in etwa der gleiche ist. Bei den Kosten für die Batteriewechseltechnologie muss weiterhin beachtet werden, dass in Abhängigkeit der Häufigkeit der Durchführung von Batteriewechselvorgängen eine gewisse Anzahl an Batterien in den Batteriewechselstationen vorgehalten werden muss. Deshalb werden die Kosten für die Ausrüstung mit Batteriewechseltechnologie unter Berücksichtigung von mittleren Akkukapazitäten und einer mittleren Auslastung der Batteriewechselstationen mit 75.000 € abgeschätzt. BYD gibt für seine Produktpalette von elektrischen Bussen unterschiedlicher Kategorien eine Ladeleistung von 80 kW an.¹²² Für Abfallsammelwagen wird die selbe Ladeleistung angenommen. Die maximale Batteriekapazität elektrisch betriebener Busse wird mit 324 kWh¹²³ bis 547 kWh¹²⁴ je nach Größe des Fahrzeugs angegeben. In dieser Arbeit wird ein Mittelwert von 449 kWh als maximale Batteriekapazität verwendet, da nicht der Einsatz unterschiedlicher Fahrzeuggrößen betrachtet wird. Weiterhin wird angenommen, dass eine Batteriekapazität von 100 kWh die Mindestausstattung sowohl für Busse als auch für Abfallsammelwagen ist. Für Abfallsammelfahrzeuge stehen keine Daten zur maximalen Batteriekapazität zur Verfügung. Deshalb wird auf

¹²⁰ Gebhardt et al. 26.04.2018, Neuer Nissan Leaf

¹²¹ Elektroauto-News.net (Hg.) 06.12.2011, Renault Fluence Z.E.

¹²² BYD (Hg.), The battery that powers BYD

¹²³ GoingElectric (Hg.) 24.06.2013, BYD eBus stellt Reichweitenrekord auf

¹²⁴ ecomento.de (Hg.) 19.05.2017, BYD liefert Mega-Elektrobus

Basis von Angaben der Batteriemasse¹²⁵ und der Energiedichte moderner Fahrzeugbatterien¹²⁶ die maximale Kapazität von Müllsammelfahrzeugen mit 300 kWh abgeschätzt. Angaben über den Preis von Fahrzeugbatterien schwanken zwischen 490 €/kWh¹²⁷ und 1.000 €/kWh¹²⁸ sehr stark und werden deshalb auch mit einem Mittelwert von 745 €/kWh abgeschätzt. Es wird angenommen, dass der Preis unabhängig vom Fahrzeugtyp ist. Der Energieverbrauch von Elektrobusen wird mit 1,26 kW/h¹²⁹ bis 1,5 kWh/km¹³⁰ angegeben. Es wird ein Energieverbrauch von 1,38 kW/h als Parameter für die Busse verwendet. Mangels verfügbarer Daten wird ein gleicher Wert auch für die Abfallsammelwagen angenommen.

Die in Kapitel 4 bestimmten Fahrtrouten für Busse werden wochentäglich bedient. Dahingegen werden die Fahrtrouten der Abfallsammelwagen nur einmal pro Woche befahren. Dies muss bei den verwendeten Kostenparametern berücksichtigt werden. Deshalb werden bei der Implementierung nur ein Fünftel der Kosten für die Ausstattung mit Batteriewechseltechnologie und für die Batteriekapazität der Abfallsammelwagen angesetzt.

Tabelle 5.1: Parameter der Fahrzeuge

	Busse	Abfallsammelwagen
Kosten Wechselfähigkeit	75.000 €	15.000 €
Ladeleistung	80 kW	80 kW
Batteriekapazität	100 kWh - 449 kWh	100 kWh - 300 kWh
Kosten pro kWh	745 €	149 €
Verbrauch	1,38 kW/h	1,38 kW/h

¹²⁵ Schmidt 24.05.2018, FES testet ab Sommer dieselfreies Müllauto

¹²⁶ ecomento.de (Hg.) 27.09.2016, Elektroauto-Batterien noch zu schwer

¹²⁷ Chen et al. 2018, A Cost-Competitiveness Analysis of Charging Infrastructure, S. 356

¹²⁸ Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe an der RWTH Aachen (Hg.) 12.08.2016, Angaben zu Elektrobusen

¹²⁹ GoingElectric (Hg.) 24.06.2013, BYD eBus stellt Reichweitenrekord auf

¹³⁰ Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe an der RWTH Aachen (Hg.) 12.08.2016, Angaben zu Elektrobusen

In Tabelle 5.2 werden die verwendeten Parameter der Ladeinfrastruktur aufgeführt. Die Angaben für die Kosten einer Ladestation variieren zwischen 225.000 €¹³¹ und 250.000 €¹³². Es wird ein Mittelwert von 238.000 € verwendet. Chen et al. (2018) geben die Kosten für eine Batterie-wechselstation mit 430.000 € an.¹³³ Es wird vereinfachend angenommen, dass Busse und Abfallsammelwagen ohne zusätzliche Kosten dieselben Ladestationen verwenden können.

Tabelle 5.2: Parameter der Ladeinfrastruktur

Errichtungskosten Ladestation	238.000 €
Errichtungskosten Batteriewechselstation	430.000 €

5.2 Implementierung des DFRLM-TW-VBC

Das in Abschnitt 3.3 entwickelte DFRLM-TW-VBC wird mit Hilfe der Programmiersprache Python 2.7 implementiert. Die Berechnung des Modells wird mit dem Solver Gurobi 7.51 auf dem Computer Cluster der RWTH Aachen unter Verwendung von bis zu 38 parallelen Threads durchgeführt. Dabei kann durch eine Verwendung der Gurobi-Parameter PreSolve = 2, BranchDir = 1, DegenMoves = 0, Heuristics = 0,001 eine Reduzierung der Rechenzeit um bis zu 30 % im Vergleich zum Standardparametersatz erzielt werden. Die Rechenzeit bis zum vollständigen Schließen des Optimalitätsgaps ist stark abhängig von der Instanzgröße, welche durch den verwendeten Cluster-Radius bei der Bestimmung potentieller Standorte und der Anzahl betrachteter Fahrzeuge angepasst werden kann. Ein Lösen des Modells zur optimalen Ladeinfrastrukturplanung für alle in Abschnitt 4.2 und 4.3 bestimmten Fahrrouten von insgesamt 268 Fahrzeugen (152 Abfallsammelwagen, 78 Busse der Westverkehr GmbH und 38 Busse der Busverkehr Rheinland GmbH) ist in annehmbarer Zeit nicht möglich. Deshalb wird das Modell zunächst für eine Anzahl von 55 Fahrzeuge und einen Cluster-Radius von 1.000 m ohne die Betrachtung von Umwegen berechnet. Anschließend wird in Abschnitt 5.3 der Einfluss von Umwegen, der Einfluss unterschiedlicher Cluster-Radien und der Einfluss einer veränderten Fahrzeuganzahl sowie die Sensitivität der in Abschnitt 5.1 definierten Parameter an einer kleineren, in kürzerer Zeit lösbaren Modellinstanz untersucht. Zur Reduzierung der Fahrzeuganzahl werden aus den in Abschnitt 4.2 und 4.3 bestimmten Fahrrouten von insgesamt 268 Fahrzeugen proportional zur ursprünglichen Verteilung der drei kommunalen Unternehmen die gewünschte Fahrzeuganzahl zufällig gezogen. Um Synergieeffekte bei der gemeinschaftlichen Planung für die drei

¹³¹ Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe an der RWTH Aachen (Hg.) 12.08.2016, Angaben zu Elektrobussen

¹³² Knote, Haufe und Saroch Mai 2017, Ansätze zur Standardisierung, S. 40

¹³³ Chen et al. 2018, A Cost-Competitiveness Analysis of Charging Infrastructure, S. 357

kommunalen Unternehmen nach dem in Abschnitt 3.1 entwickelten Vorgehen bestimmen zu können, wird das Modell zunächst für die Westverkehr GmbH, die Busverkehr Rheinland GmbH und für die Abfallsammelwagen separat gelöst. Anschließend wird das Modell für alle drei kommunalen Unternehmen gemeinschaftlich berechnet. Dabei benötigt die größte Modellinstanz der gemeinschaftlichen Planung eine Rechenzeit von 106,4 h. Im Postprocessing werden abschließend aus den optimierten Entscheidungsvariablen Vergleichswerte und die erzielten Synergieeffekte bestimmt. In Tabelle 5.3 ist das Ergebnis der Modellinstanz mit $|Q| = 55$ Fahrzeugen und einem Cluster-Radius von 1.000 m ($|N| = 69$ Cluster) aufgeführt.

Tabelle 5.3: Synergieeffekte der Ladeinfrastrukturplanung

	$ N = 69$	$ Q = 55$
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	3	5
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	1
$\overline{r^q}$	127 kWh	116 kWh
$\overline{h^q}$	0,33	0,4
Zielfunktion	5.376.351 €	6.009.369 €
Synergie	633.018 € (10,53 %)	

Durch eine gemeinschaftliche Planung der Ladeinfrastruktur kann für den betrachteten Fall eine Reduzierung der Anzahl der Ladestationen von fünf auf drei erreicht werden. Weiterhin müssen statt 40 % der Fahrzeuge nur 33 % der Fahrzeuge mit der Technologie, um Batteriewechselvorgänge ausführen zu können, ausgestattet werden. Dahingegen steigt die benötigte durchschnittliche Batteriekapazität zur Abdeckung aller Fahrrouten von 116 kWh auf 127 kWh, um den Wegfall zweier Ladestationen ausgleichen zu können. Insgesamt können bei gemeinschaftlicher Planung Synergieeffekte von 10,53 % bezogen auf die betrachteten Investitionskosten bei separater Planung erzielt werden.

In Abbildung 5.1 wird das Ergebnis der synergetischen Ladeinfrastrukturplanung grafisch ausgewertet. Dabei sind sowohl die Fahrrouten der drei kommunalen Unternehmen und ihre Ladeinfrastruktur bei separater Planung als auch die Ladeinfrastruktur bei gemeinsamer Planung eingezeichnet.

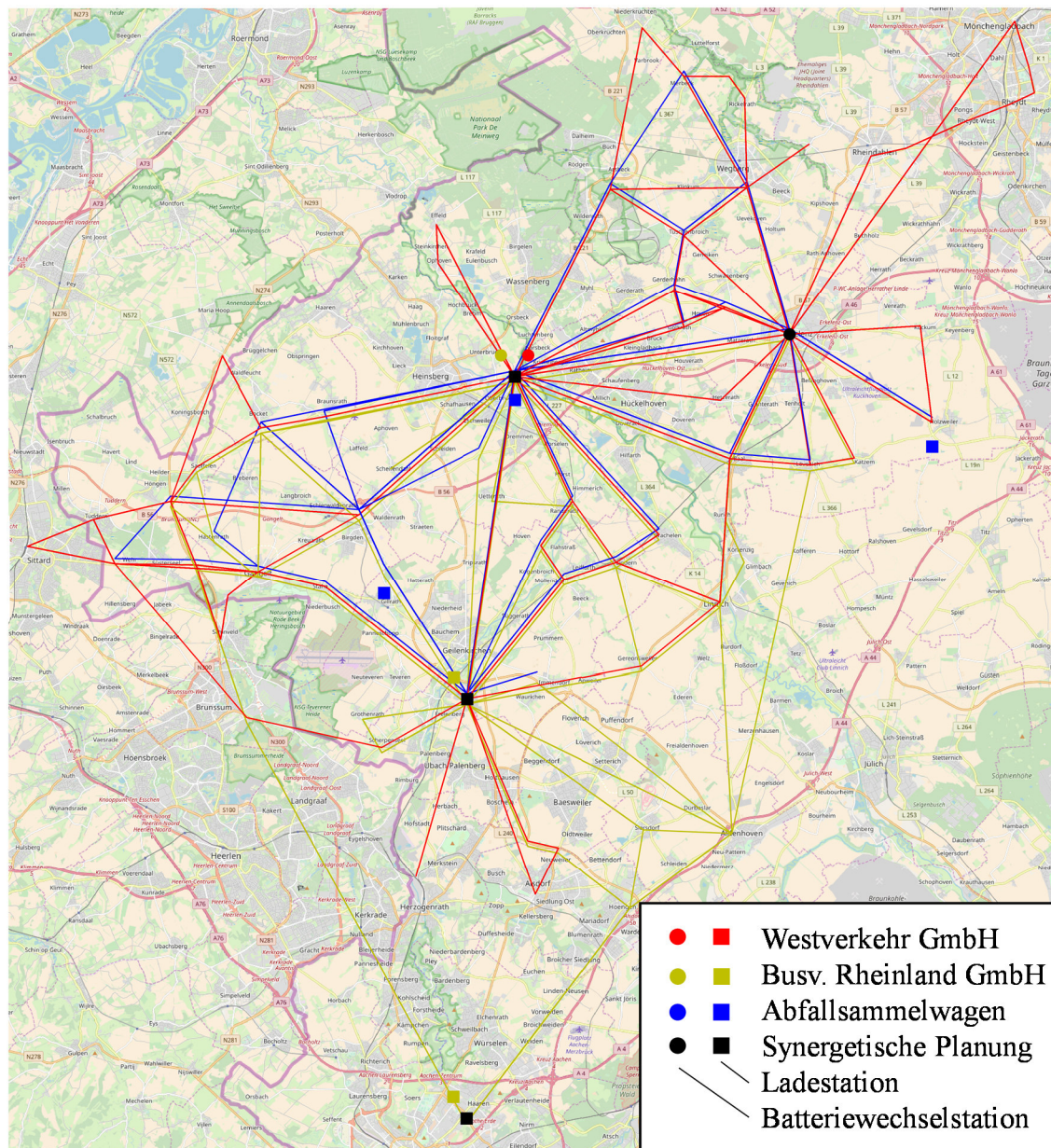


Abbildung 5.1: Synergieeffekte der Ladeinfrastrukturplanung

5.3 Sensitivitätsanalyse der verwendeten Parameter

Zum Lösen der Modellinstanz in Abschnitt 5.2 ($|Q| = 55$, $|N| = 69$) mit einer Rechenzeit von 106,4 h ist es notwendig, die Fahrzeuganzahl von 268 auf 55 zu reduzieren, einen relativ großen Cluster-Radius von 1.000 m zu wählen sowie auf die Betrachtung von Umwegen zu verzichten. Der Einfluss dieser vereinfachten Annahmen auf die bestimmten Synergieeffekte soll nachfolgend an einer weiter verkleinerten Vergleichsinstanz des Modells ($|N| = 56$, $|Q| = 10$, vgl. Abbildung V.6) untersucht werden. Dazu wird zunächst das Modell für diese Vergleichsinstanz mit dem in Abschnitt 5.1 definierten Basisparametersatz gelöst und die Synergieeffekte bestimmt. Anschließend wird die gleiche Modellinstanz unter Betrachtung von Umwegen gelöst

und die Synergieeffekte bestimmt. In Tabelle 5.4 werden die Ergebnisse dieser Berechnungen gegenübergestellt.

Tabelle 5.4: Einfluss der Berücksichtigung von Umwegen

	$ N = 56 \quad Q = 10$			$ N = 56 \quad Q = 10$	
	Basisparametersatz			Betrachtung von Umwegen	
	Gemeinsam	Separat		Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2	$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2	$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh	$\overline{r^q}$	137 kWh	135 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8	$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.792.748 €	2.346.068 €	Zielfunktion	1.792.748 €	2.308.161 €
Synergie	553.321 € (23,58 %)		Synergie	515.413 € (22,33 %)	

Für die untersuchte Modellinstanz ergibt sich für die Betrachtung von Umwegen ein geringer Rückgang der erzielten Synergieeffekte. Dies lässt sich auf eine reduzierte durchschnittliche Batteriekapazität bei separater Planung unter Betrachtung von Umwegen zurückführen. Durch eine Betrachtung von Umwegen wird mehr Planungsflexibilität im Modell abgebildet. Dies gilt sowohl für die separate Planung als auch für die gemeinschaftliche Planung. Vermutlich kommt es bei der untersuchten Vergleichsinstanz auf Grund der geringen Fahrzeuganzahl zu keiner Einsparung von Investitionskosten bei gemeinschaftlicher Planung durch die gesteigerte Planungsflexibilität. Bei gemeinschaftlicher Planung ist die Dichte an Fahrrouten im Planungsgebiet höher als bei separater Planung und damit auch die Anzahl an Fahrzeugen, die mit einer einzelnen Ladestation abgedeckt werden kann. Deshalb kann angenommen werden, dass durch eine Betrachtung von Umwegen das Einsparpotential bei separater Planung für jede Instanzgröße höher ist als bei gemeinschaftlicher Planung. Daraus folgt, dass die bestimmten Synergieeffekte bei einer vereinfachten Betrachtung ohne Umwege systematisch überschätzt werden, während die bestimmten Investitionskosten zur sicheren Seite, also zu hoch, abgeschätzt werden. Ein Nachweis dieser Annahmen ist auf Grund der steigenden Rechenzeit durch die Betrachtung von Umwegen nicht möglich.

Zur Untersuchung des Einflusses des in Abschnitt 5.2 verwendeten Cluster-Radius auf die bestimmten Synergieeffekte, werden die Vergleichsinstanz für einen Cluster-Radius von 600 m, 800 m, 1.200 m und 1.400 m und damit variierender Knotenzahl ceteris paribus berechnet und die Synergieeffekte bestimmt. Das Ergebnis der Berechnungen ist in Tabelle V.1 aufgelistet. In Abbildung 5.2 wird der Einfluss des gewählten Cluster-Radius auf die bestimmten Synergieeffekte grafisch ausgewertet.

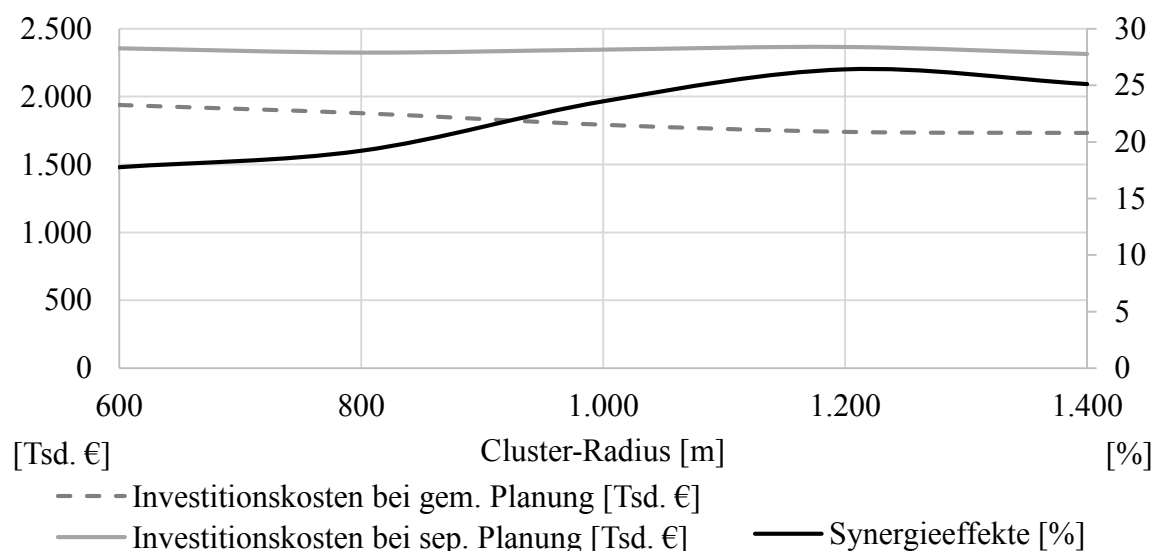


Abbildung 5.2: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Cluster-Radien

Durch eine Vergrößerung des Cluster-Radius sinken die notwendigen Investitionskosten (Kosten für Ladeinfrastruktur, Kosten für Batterien der Fahrzeuge und Kosten für Batteriewechselsfähigkeit der Fahrzeuge) bei gemeinschaftlicher Planung, da mehr Fahrrouten mit der Ladeinfrastruktur gleichzeitig abgedeckt werden können. Dieser Zusammenlegungseffekt ist bei separater Planung deutlich geringer, sodass die Investitionskosten bei separater Planung nahezu konstant bleiben. Das bedeutet, die Einsparung an Investitionskosten durch eine gemeinschaftliche Planung, also die Synergieeffekte, nehmen mit steigendem Cluster-Radius zu. Daraus folgt, dass bei der Planung von Ladeinfrastruktur mit dem DFRLM-TW-VBC für jeden konkreten Einsatzfall eine Abwägung zwischen hoher Genauigkeit des Modellierungsergebnisses und einer reduzierten Rechenzeit durch Erhöhung des Cluster-Radius möglich ist.

Die Reduzierung der Fahrzeuganzahl von 268 Fahrzeugen auf 55 Fahrzeuge in Abschnitt 5.2 hat ebenfalls einen Einfluss auf die Planung der Ladeinfrastruktur und die bestimmten Synergieeffekte. Zur Untersuchung dieses Einflusses wird das Modell mit einer Fahrzeuganzahl von 10, 29 und 55 Fahrzeugen ceteris paribus berechnet und die erzielbaren Synergieeffekte bestimmt. Dazu wird die jeweilige Fahrzeuganzahl entsprechend ihrer ursprünglichen Verteilung auf die drei untersuchten kommunalen Unternehmen aus den insgesamt 268 Fahrzeugen gezo-

gen. Das Ergebnis der Untersuchung ist in Tabelle V.8 aufgeführt. Weiterhin werden in Abbildung V.7 die Verteilung der Ladeinfrastruktur auf der Karte und die Fahrtrouten der ausgewählten Fahrzeuge dargestellt. Die grafische Auswertung des Einflusses unterschiedlicher Fahrzeuganzahl auf die untersuchten Synergieeffekte wird in Abbildung 5.3 gezeigt.

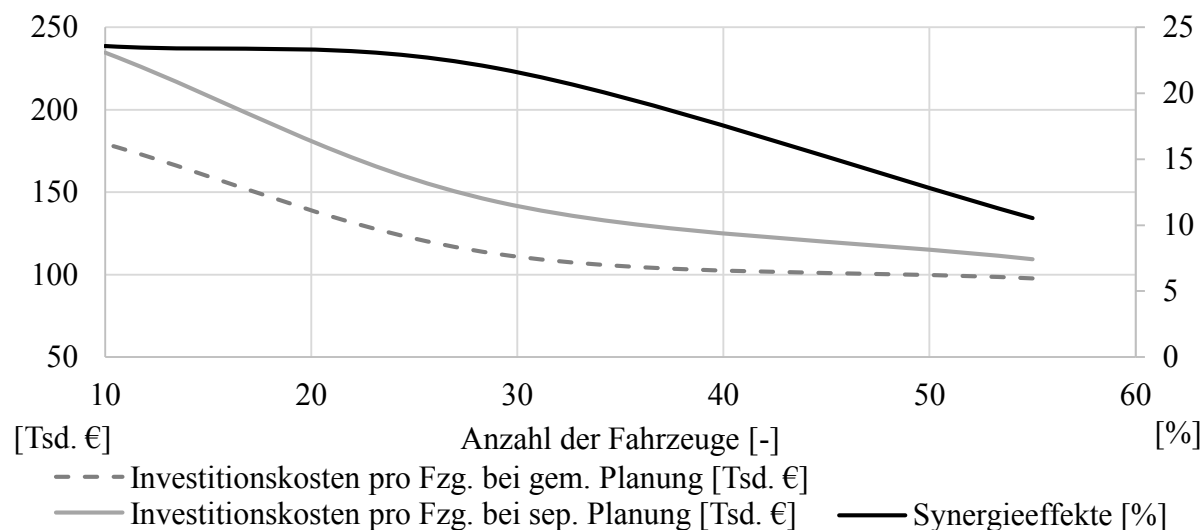


Abbildung 5.3: Untersuchung des Einflusses variierender Fahrzeuganzahlen

Die Investitionskosten pro Fahrzeug nehmen sowohl bei gemeinschaftlicher Planung als auch bei separater Planung mit steigender Fahrzeuganzahl ab, da durch die steigende Fahrzeuganzahl mehr Fahrzeuge von einer Ladestation abgedeckt werden können. Die Investitionskosten pro Fahrzeug bei separater Planung nehmen mit steigender Fahrzeuganzahl stärker ab als bei gemeinsamer Planung. Daraus folgt ein Rückgang der Synergieeffekte bei steigender Fahrzeuganzahl. Bei einer imaginären Modellinstanz bei der eine einzelne Flotte bereits so groß ist, dass sie schon das gesamte Planungsgebiet befährt, würde die Ladeinfrastruktur dieser Flotte unter Vernachlässigung der Kapazitätsbeschränkung von Ladestationen den Ladebedarf jeder weiteren Flotte abdecken. Daraus folgt, dass bei sehr großen Modellinstanzen die Synergieeffekte gegen Null konvergieren. Das bedeutet, es muss bei der Planung der Ladeinfrastruktur immer abgewogen werden, ob die in Abhängigkeit der Fahrzeuganzahl erreichbaren Synergieeffekte den Aufwand einer gemeinsamen Planung rechtfertigen.

Die in Abschnitt 5.1 bestimmten Parameter mussten teilweise abgeschätzt werden und unterliegen daher einer gewissen Unsicherheit. Insbesondere die Batteriepreise unterliegen weiterhin einer starken zeitlichen Entwicklung. Um die Robustheit des Modells auf Schwankungen der Parameter abschätzen zu können, wird eine Sensitivitätsanalyse der Parameter durchgeführt. Dazu wird bei der Vergleichsmodellinstanz der jeweils gewählte Parameter in einer Spanne von $\pm 20\%$ ceteris paribus variiert. Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse kann tabellarisch Tabelle V.9 und grafisch Abbildung V.8 entnommen werden. Den größten Einfluss auf die bestimmten Synergieeffekte haben die Kosten für die Errichtung einer Batteriewechselstation C^{Swap} . Bei

einer Variation dieser Kosten um $\pm 20\%$ ergeben sich Synergieeffekte in einem Bereich von $19,13\%$ und $25,49\%$ (Vergleichswert $23,58\%$). Weiterhin weist keiner der untersuchten Parameter einen sprunghaften Einfluss auf das Optimierungsergebnis auf. Daher kann die Wahl der Parameter als unkritisch angesehen werden.

Schon die in Abschnitt 5.2 durchgeführten Berechnungen mit einer Modellinstanz von 55 Fahrzeugen unter Vernachlässigung der Betrachtung von Umwegen und einem Cluster-Radius von 1.000 m zeigt die Eignung des DFRLM-TW-VBC zur Planung der Ladeinfrastruktur für kommunale Flotten und zur Bestimmung von Synergieeffekten. Im aktuellen Abschnitt werden die Zulässigkeit und die Auswirkungen der getroffenen Vereinfachungen validiert. Weiterhin wird die Sensitivität der verwendeten Parameter erfolgreich getestet. Die Entscheidungsvariablen, welche die Errichtung von Batteriewechselstationen, die Batteriekapazität der Fahrzeuge und die Ausstattung der Fahrzeuge mit Batteriewechsselfähigkeit erfassen, weisen für die verschiedenen Modellinstanzen teilweise sehr unterschiedliche Ausprägungen auf. Dies bestätigt die getroffenen Annahmen, auf denen das DFRLM-TW-VBC basiert. Darüber hinaus weist jede berechnete Modellinstanz Synergieeffekte für eine gemeinsame Planung aus. Weiterhin zeigen die Untersuchungen der getroffenen Vereinfachungen zwar abnehmende, jedoch existierende Synergieeffekte für steigende Fahrzeugzahlen bzw. kleinere Cluster-Radien. Damit wird erfolgreich belegt, dass Synergieeffekte bei der gemeinschaftlichen Planung der Ladeinfrastruktur mehrerer kommunaler Flotten erzielbar sind.

6 Fazit und Ausblick

In Kapitel 1 der vorliegenden Arbeit wird Elektromobilität als ein Lösungsansatz vorgestellt, um die Luftverschmutzung zu reduzieren und die Lebensqualität in Innenstädten zu verbessern. Besonders den kommunalen Unternehmen als einer der größten Flottenbetreiber im innerstädtischen Bereich kommt eine große Verantwortung zu, eine Elektrifizierung der Fahrzeuge durchzuführen. Ein Hemmnis bei der Elektrifizierung des kommunalen Straßenverkehrs stellt der unzureichende und kostenintensive Ausbau der Ladeinfrastruktur dar. Auf Basis dieses Konflikts werden zwei Forschungsfragen abgeleitet. Zum einen soll ein speziell auf die Bedürfnisse kommunaler Unternehmen zugeschnittenes Ladeinfrastrukturplanungsmodell entwickelt werden. Zum anderen soll untersucht werden, ob sich durch eine gemeinschaftliche Planung der Ladeinfrastruktur für die Flotten mehrerer kommunaler Unternehmen Synergieeffekte ergeben.

In Kapitel 2 werden Pflegedienste, Verkehrsbetriebe und die Entsorgungswirtschaft als die wichtigsten kommunalen Flottenbetreiber für eine Planung der Ladeinfrastruktur identifiziert. Die Einsatzbedingungen dieser Flotten werden untersucht und daraus Anforderungen an die Planung von Ladeinfrastruktur abgeleitet. Anschließend wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung auf dem Gebiet der Ladeinfrastrukturplanung gegeben und dieser mit den Anforderungen der Ladeinfrastrukturplanung kommunaler Flotten abgeglichen.

Da keiner der bereits existierenden Ansätze den speziellen Anforderungen kommunaler Flotten an die Ladeinfrastrukturplanung gerecht wird, wird in Kapitel 3 mit dem Deviation-Flow-Refueling-Location-Model with Time-Windows and Variable-Battery-Capacity ein Ladeinfrastrukturplanungsmodell für kommunale Flotten entwickelt. Dabei werden die gleichzeitige Planung von Ladestationen und Batteriewechselstationen, variable Batteriekapazitäten der Fahrzeuge und die Ausstattung der Fahrzeuge mit Batteriewechseltechnologie bei voller Abdeckung aller Fahrrouten betrachtet. In Abgrenzung zum Stand der Forschung wird eine Formulierung des Modells, basierend auf einer separaten Indizierung der Ladeinfrastruktur und der Fahrzeugwegpunkte, entwickelt, welche die Abbildung des mehrfachen Anfahrens von Knoten ohne das bisher übliche Einführen von Dummy-Knoten ermöglicht. Ferner wird in Kapitel 3 ein Vorgehen zur Bestimmung von Synergieeffekten bei der gemeinschaftlichen Planung mehrerer kommunaler Unternehmen unter Verwendung des Optimierungsergebnisses des DFRLM-TW-VBC entwickelt.

In Kapitel 4 werden die Fahrrouten für Pflegedienste, Busse im ÖPNV und Abfallsammelwagen unter Berücksichtigung detaillierter Prämissen generiert. Eine Auswertung der täglich zu fahrenden Entfernungen der Pflegedienste zeigt, dass diese vollständig mit einer Batterieladung abgedeckt werden können und deshalb bei der Ladeinfrastrukturplanung nicht weiter berück-

sichtigt werden müssen. Aus den generierten Fahrrouten werden potentielle Standorte von Ladeinfrastruktur abgeleitet und mögliche Umwege der Fahrzeuge von ihrer ursprünglichen Fahrrouten berechnet.

In Kapitel 5 werden zur Implementierung des DFRLM-TW-VBC notwendigen Parameter bestimmt. Anschließend wird mit Hilfe des Modells die Ladeinfrastruktur für Busse und Abfallsammelwagen geplant sowie durch eine gemeinschaftliche Planung erzielbare Synergieeffekte berechnet. Das Modell benötigt eine sehr hohe Rechenzeit bis zur vollständigen Lösung. Deshalb werden vereinfachende Annahmen, wie die Nicht-Berücksichtigung von Umwegen, die Reduktion der Auflösung des Netzgraphen sowie die Reduktion der Fahrzeuganzahl getroffen. Der Einfluss dieser vereinfachenden Annahmen auf das Optimierungsergebnis und die bestimmten Synergieeffekte werden untersucht. Für die berechneten Modellinstanzen können Synergieeffekte von bis zu 25,5 % durch eine gemeinschaftliche Planung erreicht werden. Auf Basis dieses Ergebnisses können beide Forschungsfragen erfolgreich beantwortet werden.

In der vorliegenden Arbeit werden sowohl bei der Modellierung als auch bei der Lösung des Modells vereinfachende Annahmen getroffen, aus welchen Fragen für zukünftige Forschung resultieren. Bei der Modellierung des DFRLM-TW-VBC werden Kapazitätseinschränkungen von Ladestationen bzw. Batteriewechselstationen nicht berücksichtigt. Eine Untersuchung dieser Vereinfachung auf die bestimmten Investitionskosten und Synergieeffekte sollte Gegenstand zukünftiger Forschung sein. Eine Modellinstanz, welche alle 268 Fahrzeugrouten der Busse und Abfallsammelwagen im Kreisheinsberg beinhaltet, ist nicht in annehmbarer Zeit lösbar. Während das Vernachlässigen der Betrachtung von Umwegen weniger kritisch ist, sind eine ausreichende Genauigkeit des Netzgraphen und die Anzahl der Berücksichtigten Fahrzeuge von hoher Bedeutung für eine aussagekräftige Ladeinfrastrukturplanung. Deshalb sollte die Entwicklung eines alternativen Lösungsverfahrens zur Lösung großer Modellinstanzen ebenfalls zukünftig erforscht werden.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit folgen zwei Implikationen für die strategische bzw. taktische Planung kommunaler Unternehmen in der Praxis. Zum einen stellt das entwickelte DFRLM-TW-VBC ein detailliertes und auf die Bedürfnisse kommunaler Flotten zugeschnittenes Ladeinfrastrukturplanungsmodell dar. Zum anderen können durch eine unternehmensübergreifende Ladeinfrastrukturplanung Synergieeffekte erzielt werden.

V Anhang

V.1 Datengenerierung Pflegedienste

Overpass Anfrage V.1: Gebäude

```
https://www.overpass-api.de/api/interpreter?data=
[out:json];
area[name="Wegberg"][[admin_level=8]][boundary=administrative];
way(area)[building];
(._;>>.);
out;
```

Tabelle V.1: Verteilung der OSM-Gebäudetypen

OSM Tag	Abfallbedarf	Pflegebedarf	Anzahl
"yes"	True	True	233637
"residential"	True	True	1601
"garage"	False	False	1582
"house"	True	True	636
"greenhouse"	False	False	242
"chapel"	True	False	107
"apartments"	True	True	89
"commercial"	True	False	73
"roof"	False	False	48
"church"	True	False	43
"school"	True	False	43
"garages"	False	False	42

"industrial"	True	False	24
"retail"	True	False	19
"farm"	True	False	11
"detached"	True	False	10

Tabelle V.2: Ambulante Pflegedienste im Kreis Heinsberg

Betreiber	Adresse	Breitengrad	Längengrad
1. Ambulantes Pflege-Zentrum	Goswinstr. 28, 41812 Erkelenz	51,0757931	6,3132812
2. Caritas-Pflegestation Erkelenz	Graf-Reinald-Str. 27 a, 41812 Erkelenz	51,0730100	6,3153500
3. DEMO Krankenpflege GmbH	Südpromenade 17, 41812 Erkelenz	51,0776596	6,3136015
4. MEDICUR Pflegedienst	Adam-Stegerwaldhof 1-3, 41812 Erkelenz	51,0776300	6,3052000
5. Katharina Kasper ViaNo-bis GmbH	Katharina-Kasper-Str. 6 52538 Gangelt	50,9929341	5,9948787
6. SZB Häusliche Krankenpflege	Hauptstr. 15 52538 Gangelt	51,0053302	6,0230119
7. AHK Herbert von Berg	Römerstr. 4 52511 Geilenkirchen	50,9441752	6,1521935
8. Ambulante häusliche Krankenpflege Edgar	Friedlandplatz 10 52511 Geilenkirchen	50,9625129	6,1224799
9. Caritas-Pflegestation Geilenkirchen	Konrad-Adenauer-Str. 196 52511 Geilenkirchen	50,9648600	6,1184000
10. Franziskusheim gGmbH	Zum Kniepbusch 5 52511 Geilenkirchen	50,9607900	6,1136700
11. Häusliche Krankenpflege und Seniorenservice	Jan-von-Werth-Str. 89 52511 Geilenkirchen	50,9765300	6,1503399

Betreiber	Adresse	Breitengrad	Längengrad
12. ProVita Pflegedienst Kreis Heinsberg GmbH	Karl-Arnold-Str. 239, 52511 Geilenkirchen	50,9832452	6,0594095
13. Spes Ambulante Pflege GmbH	Konrad-Adenauer-Str. 174, 52511 Geilenkirchen	50,9644186	6,1196525
14. Ambulanter Pflegedienst Scherrers	Rosenweg 21, 52525 Heinsberg	51,0689356	6,0767644
15. AWO Ambulante Pflege Heinsberg	Probst-Krüppel-Str. 21, 52525 Heinsberg	51,0574300	6,0955900
16. Betreuung & Alltagsbe- gleitung AT GmbH	Apfelstr. 36, 52525 Heins- berg	51,0632302	6,0940543
17. Caritas-Pflegestation Heinsberg	Apfelstr. 55, 52525 Heins- berg	51,0625122	6,0933074
18. HUMANITA Pflege & Betreuung	Apfelstr. 48, 52525 Heins- berg	51,0628121	6,0938046
19. Lebenshilfe Heinsberg e. V.	Händelstr. 1b, 52525 Heinsberg	51,0562200	6,1540100
20. Pflege- und Betreuungs- dienst Mertens	Heerweg 31, 52525 Heins- berg	51,0128100	6,1869900
21. Pflegedienst Karin Pel- zer	Pfingsstuhl 9, 52525 Heinsberg	51,0857300	6,0580700
22. Pflege team Dreßen/Lap- rell	Sittarder Str. 30, 52525 Heinsberg	51,0580500	6,0874600
23. AWO Sozialstation Hückelhoven	Bauerstr. 38, 41836 Hückelhoven	51,0571516	6,2243085
24. Caritas-Pflegestation Hückelhoven	Dinstühlerstr. 29, 41836 Hückelhoven	51,0498900	6,2290800
25. Caritas-Pflegestation Hückelhoven	Dinstühlerstr. 29, 41836 Hückelhoven	51,0498900	6,2290800
26. Krankenpflegedienst Roland Hensch	Dr.-Ruben-Str. 36, 41836 Hückelhoven	51,0558981	6,2267040

Betreiber	Adresse	Breitengrad	Längengrad
27. Pflegedienst Reischert	Finkenweg 24, 41836 Hückelhoven	51,0072900	6,2324800
28. Pflege team Raphael BbR	Parkhofstr. 57, 41836 Hückelhoven	51,0531995	6,2231834
29. Riedel Institut	Parkhofstr. 45, 41836 Hückelhoven	51,0523890	6,2230424
30. St. Gereon Senioren- dienste gGmbH	Klosterberg 7, 41836 Hückelhoven	51,0047379	6,2415850
31. Alten- und Kranken- pflege Seemann	Rimburger Acker 1, 52531 Übach-Palenberg	50,9198363	6,1024515
32. AWO Ambulante Pflege Heinsberg	Carlsstr. 2, 52531 Übach-Palenberg	50,9211184	6,1131900
33. Gesundheits- und Pfl- gezentrum Übach	Carolus-Magnus-Str.17, 52531 Übach-Palenberg	50,9203811	6,1164400
34. PflegeEngel.Info	Em Koddess 3, 52531 Übach-Palenberg	50,9198786	6,1194410
35. Pro retis	Carlstr. 38-48, 52531 Übach-Palenberg	50,9243700	6,1108575
36. VIVO GbR	Kirchstr. 20, 52531 Übach-Palenberg	50,9246665	6,1016826
37. Ambulanter Pflegedienst Paulis	Hartweg 68, 52525 Wald- feucht	51,0504038	5,9969226
38. ASB Regionalverband- Rhein-Erft-Düren e.V.	Kirchstr. 26, 41849 Was- senberg	51,1001344	6,1592689
39. Caritas-Pflegestation Wassenberg	Am Gasthausbach 47, 41849 Wassenberg	51,0984500	6,1531300
40. Johanniter Ambulanter Pflegedienst	Gladbacher Str. 18, 41849 Wassenberg	51,1056353	6,1770623
41. Pflegedienste Kuijpers	Gladbacher Str. 5b, 41849 Wassenberg	51,1052178	6,1756048

Betreiber	Adresse	Breitengrad	Längengrad
42. Pro Domo Mobiler Pflegedienst GmbH	Gladbacher Str. 4, 41849 Wassenberg	51,1046873	6,1758779
43. Caritas-Pflegestation Wegberg	Kreuzherrenstr. 2a, 41844 Wegberg	51,1407177	6,2789253

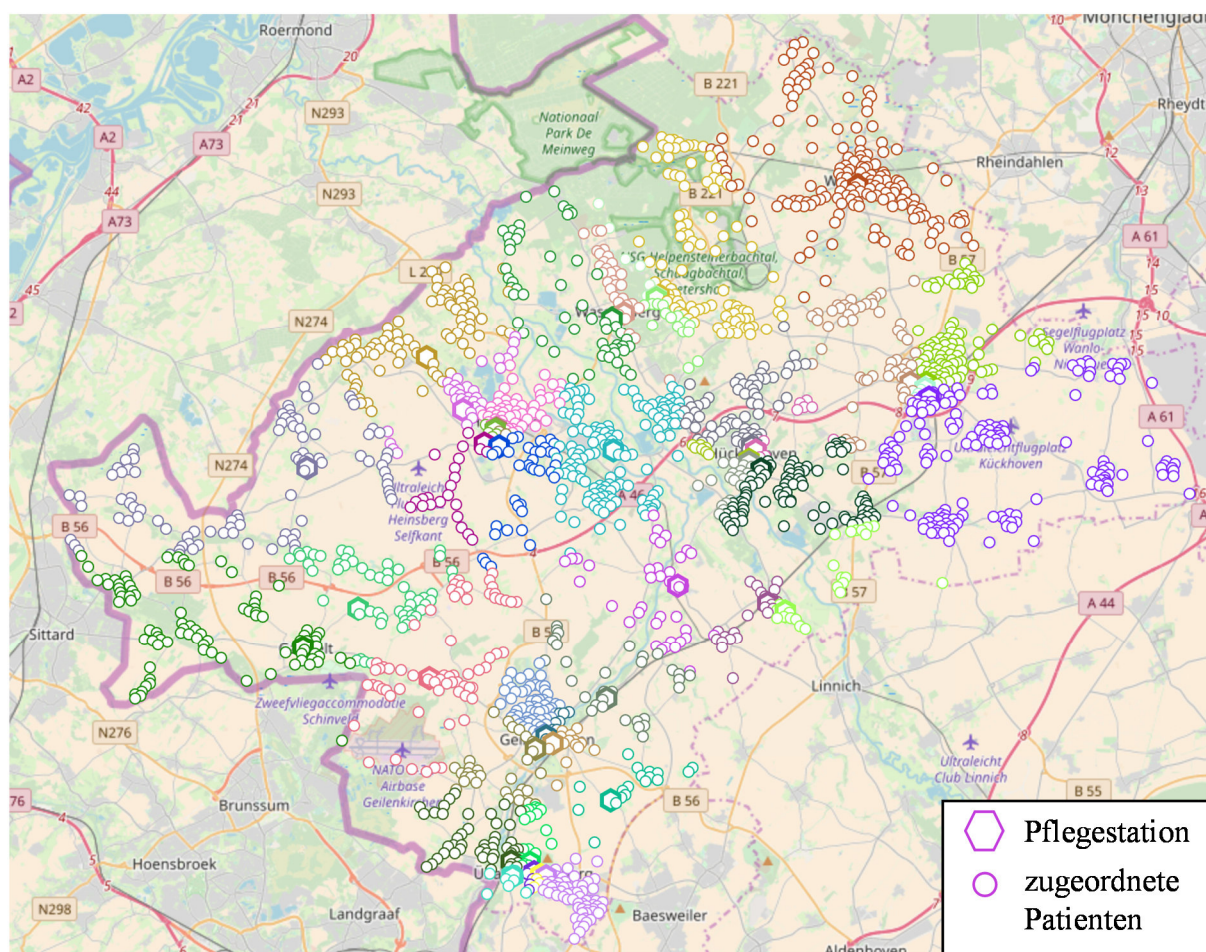


Abbildung V.1: Pflegestationen und Patienten im Kreis Heinsberg

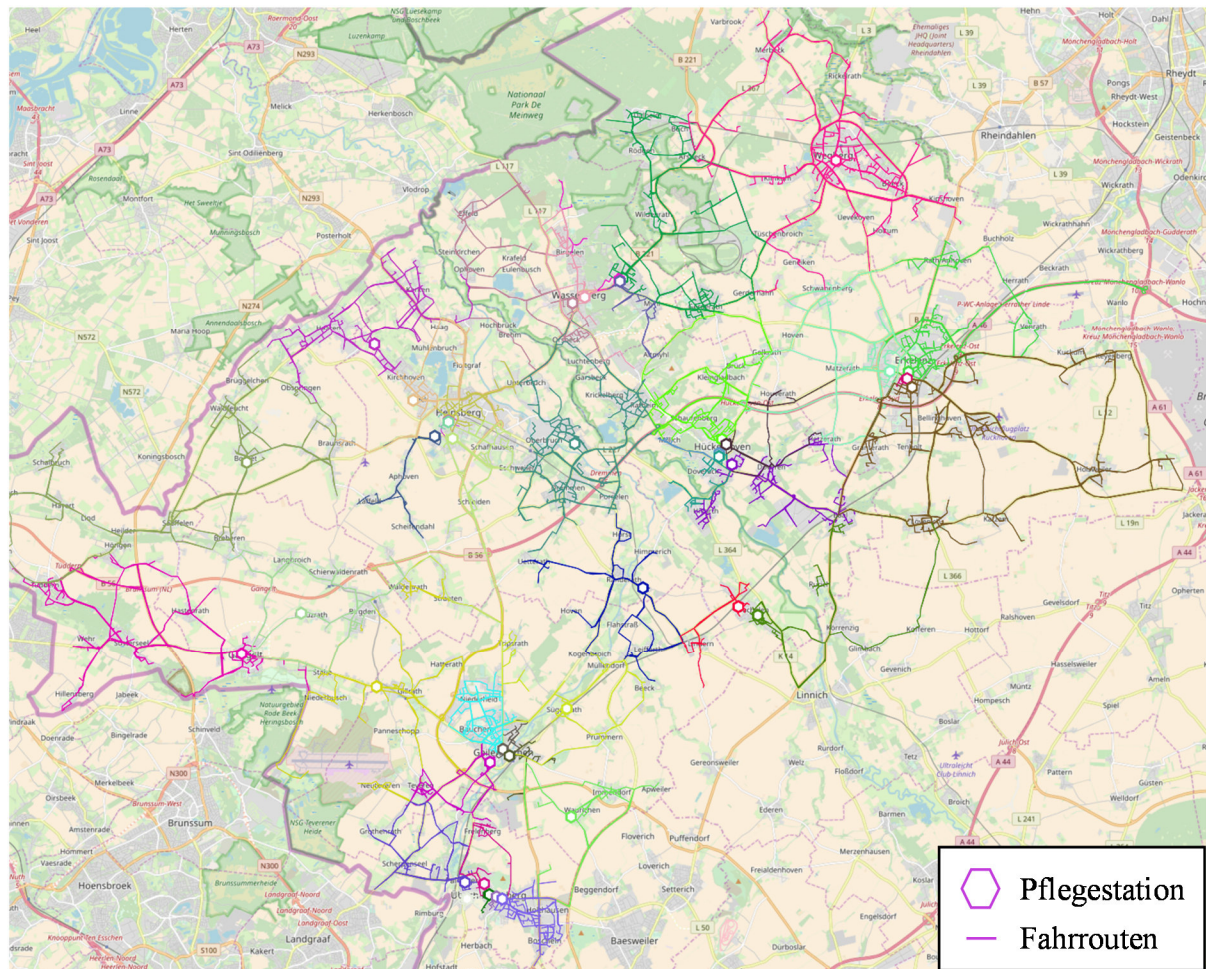


Abbildung V.2: Ergebnis der Tourenplanung für Pflegedienste

V.2 Modell zur Tourenplanung für Pflegedienste

Tabelle V.3: Notation des Modells zur Tourenplanung der Pflegedienste

i, j, h	Index der Knoten
i_{fe}	Index des Knoten, an dem die Frühschicht endet
i_{sa}	Index des Knoten, an dem die Spätschicht anfängt
f	Index der Fahrzeuge
T_{ij}	Zeitbedarf für das Zurücklegen der Strecke von Knoten i zu Knoten j [min]

B_i^f	Behandlungszeit des Patienten am Knoten i [min]
$A_{i,j}$	Mindestzeitabstand zwischen dem Besuch am Knoten i und dem Besuch am Knoten j [min]
N	Mindestanzahl der verwendeten Fahrzeuge
P	Menge der Knoten, an denen Patientenbesuche stattfinden
D_+	Menge der Anfangs-Depots (eins für die Frühschicht und eins für die Spätschicht)
D_-	Menge der End-Depots (eins für die Frühschicht und eins für die Spätschicht)
F	Menge der Fahrzeuge
C	Menge der Knoten-Tupel (i, j) , zwischen denen ein Mindestzeitabstand für die Besuche definiert ist
$j = f(i)$	Funktion, die für einen Anfangs-Knoten i aus D_+ den zugehörigen End-Knoten j aus D_- zurückgibt
y^f	binär: Fahrzeug f wird verwendet
$x_{i,j}^f$	binär: Fahrzeug f fährt von Knoten i zum Knoten j
s_i^f	Ankunftszeit des Fahrzeugs f am Knoten i [min]
t_i	Ankunftszeit am Knoten i [min]

Die Zielfunktion (V.1) minimiert die Anzahl der verwendeten Fahrzeuge. Die Nebenbedingungen (V.2) stellen die Flusserhaltung der Fahrzeuge dar. Wird ein Knoten h von einem Fahrzeug angefahren, so muss das Fahrzeug den Knoten auch wieder verlassen. In den Restriktionen

(V.3) wird festgelegt, dass jeder zu einem Patientenbesuch gehörende Knoten genau einmal angefahren werden muss. Die Randbedingungen (V.4) koppeln die Variablen x_{ij}^f , die angeben, ob ein Fahrzeug von einem Patientenbesuch am Knoten i zu einem Patientenbesuch am Knoten j fährt, an die Variablen y^f , welche die Fahrzeugbenutzung erfasst. In (V.5) wird dafür gesorgt, dass ein Fahrzeug der Frühschicht auch zum End-Knoten der Frühschicht zurückkehrt und dass ein Fahrzeug der Spätschicht zum zugehörigen End-Knoten zurückkommt. Die Restriktionen (V.6) beschränken die Schichtlänge der Frühschicht und der Spätschicht auf jeweils 8 h. Die Nebenbedingungen (V.7) legen fest, dass der Zeitpunkt des Schichtanfangs der Spätschicht nach dem Zurückkehren des Fahrzeugs aus der Frühschicht liegen muss. In den Bedingungen (V.8) bis (V.11) wird die Einhaltung der Fahr- und Behandlungszeiten definiert und der Subtour-Elimination-Constraint nach Miller-Tucker-Zemlin formuliert. Eine Aufteilung in vier einzelne Ungleichungen ist notwendig, da die Ankunftszeit bei den Patienten fahrzeugunabhängig indexiert ist, während die Ankunftszeiten am Depot für jedes Fahrzeug unterschiedlich sein können. Durch dieses Vorgehen kann die Größe der Modellinstanzen verkleinert werden und somit die Rechenzeit reduziert werden. Die Nebenbedingungen (V.12) legen für bestimmte Patientenbesuche einen zeitlichen Mindestabstand zwischen den Besuchen fest. Abschließend bestimmen (V.13) eine Mindestanzahl zu verwendender Fahrzeuge. Dadurch wird der Lösungsraum des Problems verkleinert und die Rechenzeit weiter reduziert. Die Mindestanzahl wird auf Basis der benötigten Patientenbesuchszeiten zur sicheren Seite abgeschätzt. In (V.14) und (V.15) werden die Variablen y^f und x_{ij}^f als binär definiert. (V.16) und (V.17) definieren die Variablen s_i^f und t_i als nicht-negative rationale Zahl.

$$\min Z = \sum_{f \in F} y_f \quad (V.1)$$

$$\sum_{\substack{i \in [P \cup D_+] \\ i \neq h}} x_{ih}^f - \sum_{\substack{j \in [P \cup D_-] \\ j \neq h}} x_{hj}^f = 0 \quad \forall h \in P, \forall f \in F \quad (V.2)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{\substack{i \in [P \cup D_+] \\ i \neq j}} x_{ij}^f = 1 \quad \forall j \in P \quad (V.3)$$

$$\sum_{j \in [P \cup D_-]} x_{i,j}^f \leq y^f \quad \forall i \in D_+, \forall f \in F \quad (V.4)$$

$$\sum_{j \in [P \cup D_-]} x_{i,j}^f - \sum_{j \in [P \cup D_+]} x_{j,f(i)}^f = 0 \quad \forall i \in D_+, \forall f \in F \quad (V.5)$$

$$s_{f(i)}^f - s_i^f \leq 8 * 60 \quad \forall i \in D_+, \forall f \in F \quad (V.6)$$

$$s_{i_{sa}}^f - s_{i_{fe}}^f \geq 1 \quad \forall f \in F \quad (V.7)$$

$$t_j + \text{big}M(1 - x_{i,j}^f) \geq t_i + B_i + T_{i,j} \quad \forall i, j \in P, \forall f \in F \quad (V.8)$$

$$s_j^f + \text{big}M(1 - x_{i,j}^f) \geq t_i + B_i + T_{i,j} \quad \forall i \in P, \forall j \in D_-, \forall f \in F \quad (V.9)$$

$$t_j + \text{big}M(1 - x_{i,j}^f) \geq s_i^f + T_{i,j} \quad \forall i \in D_+, \forall j \in P, \forall f \in F \quad (V.10)$$

$$s_j^f + \text{big}M(1 - x_{i,j}^f) \geq s_i^f + T_{i,j} \quad \forall i \in D_+, \forall j \in D_-, \forall f \in F \quad (V.11)$$

$$t_i + A_{i,j} \leq t_j \quad \forall (i, j) \in C \quad (V.12)$$

$$\sum_{f \in F} y^f \geq N \quad (V.13)$$

$$y^f \in \{0,1\} \quad \forall f \in F \quad (V.14)$$

$$x_{ij}^f \in \{0,1\} \quad \forall i \in [P \cup D_+], \forall j \in [P \cup D_-], \forall f \in F \quad (V.15)$$

$$s_i^f \geq 0 \quad \forall i \in [D_+ \cup D_-], \forall f \in F \quad (V.16)$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall i \in P \quad (V.17)$$

V.3 Datengenerierung Busse im ÖPNV

Overpass Anfrage V.2: Grenze des Kreises Heinsberg

```
https://www.overpass-api.de/api/interpreter?data=
[out:json];
rel(62767);
(._;>>);
out;
```

Tabelle V.4: Standorte der Busdepots

Betreiber	Adresse	Breitengrad	Längengrad
Depot der Westverkehr GmbH	Geilenkirchener Kreisbahn 1, 52511 Geilenkirchen	50,960914	6,123441
Depot der Busverkehr Rheinland GmbH	Neuköllnerstraße 1, 52068 Aachen	50,785264	6,129781

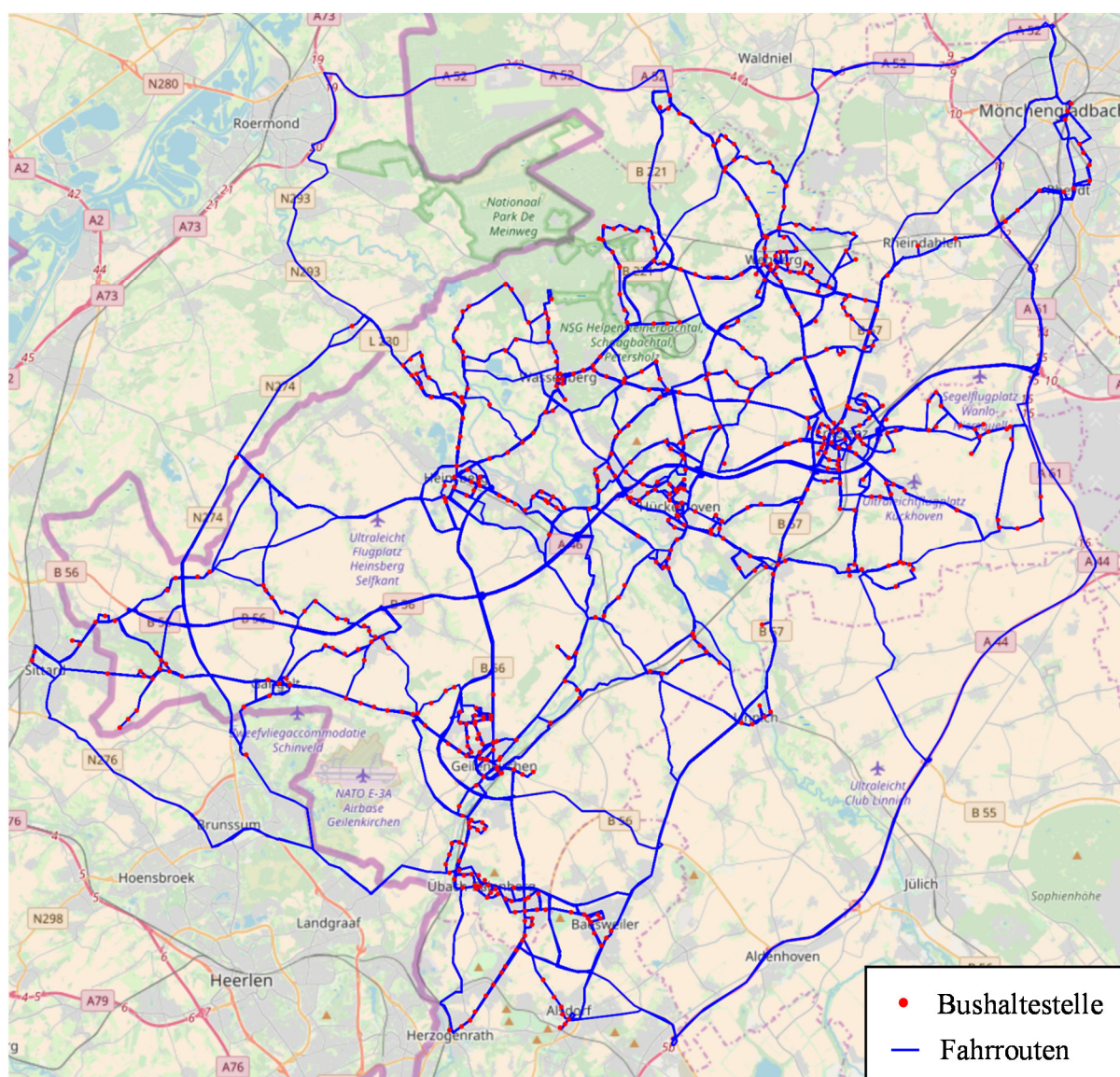


Abbildung V.3: Fahrtrouten der Westverkehr GmbH



Abbildung V.4: Fahrtrouten der Busverkehr Rheinland GmbH

V.4 Modell zur Tourenplanung für Busse im ÖPNV

Tabelle V.5: Notation des Modells zur Tourenplanung der Busse

i, j, h	Index der Knoten
i_{ds}	Index des Start-Depot-Knoten
i_{de}	Index des End-Depot-Knoten
f	Index der Fahrzeuge
T_{ij}	Zeitbedarf für das Zurücklegen der Strecke von Knoten i zu Knoten j [min]
S_i	Startzeitpunkt der Fahrgastfahrt am Knoten i [min]
N	Menge aller Knoten (außer Depot-Knoten)
$\delta^+(i)$	Menge der Knoten, von denen ausgehend Knoten i angefahren werden kann
$\delta^-(i)$	Menge der Knoten, die ausgehend von Knoten i angefahren werden können
F	Menge der Fahrzeuge
P	Menge der Knoten-Tupel (i, j) , zwischen denen eine Fahrgastfahrt besteht
A	Menge der Knoten-Tupel (i, j) , zwischen denen eine Kante existiert
y^f	binär: Fahrzeug f wird verwendet

x_{ij}^f	binär: Fahrzeug f fährt von Knoten i zum Knoten j
------------	---

t_i^f	Ankunftszeit des Fahrzeugs f am Knoten i [min]
---------	--

Die Zielfunktion (V.18) des Modells minimiert die Gesamtzahl der verwendeten Busse. Die Nebenbedingungen (V.19) stellen die Flusserhaltung der Fahrzeuge dar. Fährt ein Fahrzeug f einen Knoten h an, so muss es diesen auch wieder verlassen. In den Randbedingungen (V.20) wird festgelegt, dass jede Fahrgastfahrt von genau einem Bus befahren werden muss. Die Nebenbedingungen (V.21) und (V.22) koppeln die Variablen x_{ij}^f , die angeben ob ein Fahrzeug die Strecke zwischen Knoten i und j befährt, an die Variablen y^f , welche die Fahrzeugbenutzung erfassen. Dabei legen die Restriktionen (V.21) fest, dass jedes Fahrzeug was das Depot verlässt, als verwendet gilt. Ferner definieren (V.22), dass jedes verwendete Fahrzeug auch wieder zum Depot zurückkehren muss. Die Randbedingungen (V.23) sorgen für die Einhaltung der Fahrzeiten und stellen gleichzeitig als Formulierung nach Miller-Tucker-Zemlin die Subtour-Elimination-Constraint dar. In den Nebenbedingungen (V.24) wird für alle Startknoten von Fahrgastfahrten eine Startzeit festgelegt. In (V.25) und (V.26) werden die Variablen y^f und x_{ij}^f als Binärvariablen definiert. (V.27) definieren abschließend die Variablen t_i^f als nicht-negative rationale Zahl.

$$\min Z = \sum_{f \in F} y_f \quad (V.18)$$

$$\sum_{i \in \delta^+(h)} x_{ih}^f - \sum_{j \in \delta^-(h)} x_{hj}^f = 0 \quad \forall h \in N, \forall f \in F \quad (V.19)$$

$$\sum_{f \in F} x_{ij}^f = 1 \quad \forall (i, j) \in P \quad (V.20)$$

$$\sum_{j \in \delta^-(i_{ds})} x_{i_{ds} j}^f = y^f \quad \forall f \in F \quad (V.21)$$

$$\sum_{i \in \delta^+(j_{de})} x_{i j_{de}}^f = y^f \quad \forall f \in F \quad (V.22)$$

$$t_j^f + bigM(1 - x_{i j}^f) \geq t_i^f + T_{i j} \quad \forall (i, j) \in A, \forall f \in F \quad (V.23)$$

$$t_i^f = S_i \quad \forall (i, j) \in P, \forall f \in F \quad (V.24)$$

$$y^f \in \{0, 1\} \quad \forall f \in F \quad (V.25)$$

$$x_{i j}^f \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, \forall f \in F \quad (V.26)$$

$$t_i^f \geq 0 \quad \forall i \in [N \cup \{i_{ds}, i_{de}\}], \forall f \in F \quad (V.27)$$

V.5 Datengenerierung Abfallsammelwagen

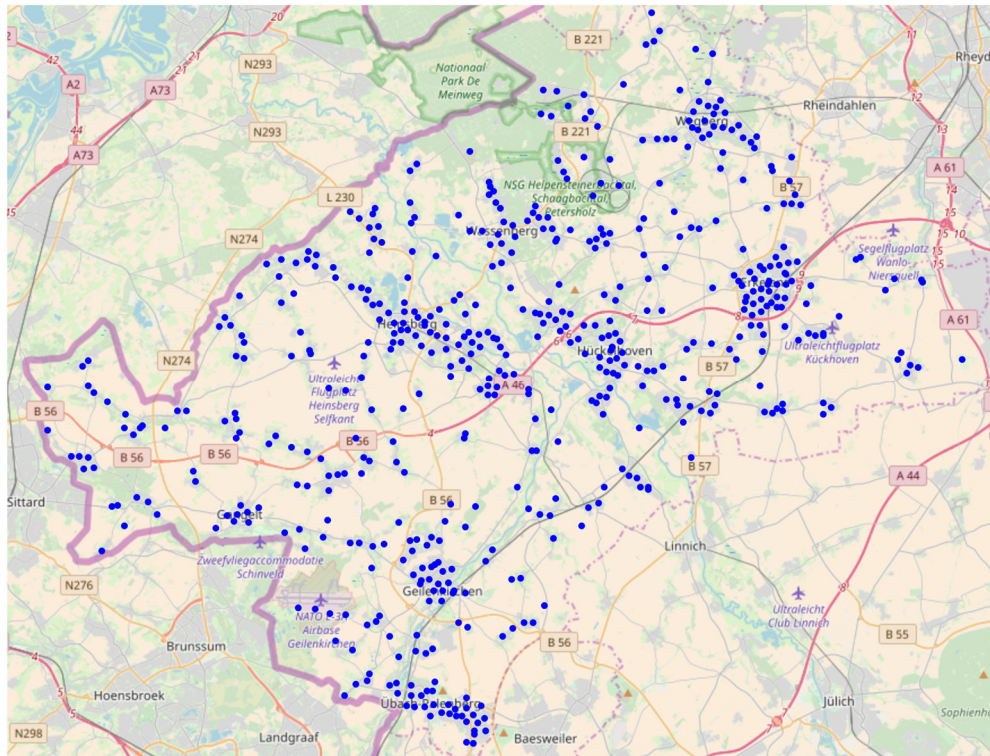


Abbildung V.5: Abfallcluster im Kreis Heinsberg

V.6 Modell zur Tourenplanung für Abfallsammelwagen

Tabelle V.6: Notation des Modells zur Tourenplanung der Abfallsammelwagen

i, j, h	Index der Knoten
f	Index der Fahrzeuge
$T_{i j}$	Zeitbedarf für das Zurücklegen der Strecke von Knoten i zu Knoten j [min]
N	Mindestanzahl der verwendeten Fahrzeuge
M	Menge der Knoten, an denen Abfall abgeholt werden muss

A	Menge der Knoten der Abladestation
D_+	Menge des Knoten des Anfangs-Depots
D_-	Menge des Knoten des End-Depots
F	Menge der Fahrzeuge
y^f	binär: Fahrzeug f wird verwendet
x_{ij}^f	binär: Fahrzeugs f fährt von Knoten i zum Knoten j
c_i^f	Lademenge des Fahrzeugs f am Knoten i [4 t]
t_i^f	Ankunftszeit des Fahrzeugs f am Knoten i [min]

Die Zielfunktion (V.28) minimiert die Anzahl der verwendeten Fahrzeuge. Die Nebenbedingungen (V.29) stellen die Flusserhaltung der Fahrzeuge dar. Wird ein Knoten h von einem Fahrzeug angefahren, so muss das Fahrzeug den Knoten auch wieder verlassen. In Restriktionen (V.30) wird festgelegt, dass Knoten, an denen Abfall abgeholt werden muss, genau einmal angefahren werden. Die Randbedingungen (V.31) koppeln die Variablen y^f , welche die Fahrzeugbenutzung erfassen, an das Verlassen des Depots. In den Bedingungen (V.32) wird die Einhaltung der Fahrzeiten definiert und der Subtour-Elimination-Constraint nach Miller-Tucker-Zemlin formuliert. Die Restriktionen (V.33) beschränken die Arbeitszeit auf 8 h. Die Nebenbedingungen (V.34) definieren, dass die Ladekapazität der Fahrzeuge beim Anfahren eines Abfallknoten um eine Ladeeinheit erhöht wird. Dabei werden Lademengen von 4 t auf eine Ladeinheit normiert. (V.35) bestimmen, dass beim Anfahren des End-Depots die Ladekapazität konstant bleibt. Das vollständige Entladen an der Abladestation wird in den Bedingungen (V.36) definiert. Ferner beschränken (V.37) die Ladekapazität auf zwei Ladeeinheiten und (V.38) geben an, dass Fahrzeuge bei der Ankunft am End-Depot vollständig entladen sein müssen. Abschließend bestimmen (V.39) eine Mindestanzahl zu verwendender Fahrzeuge. Dadurch wird der Lösungsraum des Problems verkleinert und die Rechenzeit reduziert. Die Mindestanzahl wird auf Basis der Anzahl der Knoten, an denen Abfall abgeholt werden muss, zur sicheren Seite abgeschätzt. In (V.40) und (V.41) werden die Variablen y^f und x_{ij}^f als binär

definiert. (V.42) und (V.43) definieren die Variablen c_i^f und t_i^f als nicht-negative rationale Zahl.

$$\min Z = \sum_{f \in F} y_f \quad (V.28)$$

$$\sum_{\substack{i \in [M \cup A \cup D_+] \\ i \neq h}} x_{ih}^f - \sum_{\substack{j \in [M \cup A \cup D_-] \\ j \neq h}} x_{hj}^f = 0 \quad \forall h \in [M \cup A], \forall f \in F \quad (V.29)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{\substack{i \in [M \cup A \cup D_+] \\ i \neq j}} x_{ij}^f = 1 \quad \forall j \in M \quad (V.30)$$

$$\sum_{j \in [M \cup A \cup D_-]} x_{ij}^f \leq y^f \quad \forall i \in D_+, \forall f \in F \quad (V.31)$$

$$t_j^f + \text{big}M(1 - x_{ij}^f) \geq t_i^f + T_{ij} \quad \forall f \in F, \forall i \in [M \cup A \cup D_+] \\ i \neq j, \forall j \in [M \cup A \cup D_-] \quad (V.32)$$

$$t_j^f \leq 8 * 60 \quad \forall i \in D_-, \forall f \in F \quad (V.33)$$

$$c_j^f + \text{big}M(1 - x_{ij}^f) \geq c_i^f + 1 \quad \forall f \in F, \forall i \in [M \cup A \cup D_+] \\ i \neq j, \forall j \in M \quad (V.34)$$

$$c_j^f + \text{big}M(1 - x_{ij}^f) \geq c_i^f \quad \begin{array}{l} \forall f \in F, \forall i \in [M \cup A \cup D_+] \\ i \neq j, \forall j \in D_- \end{array} \quad (V.35)$$

$$c_j^f + \text{big}M(1 - x_{ij}^f) \geq c_i^f - 2 \quad \begin{array}{l} \forall f \in F, \forall i \in [M \cup A \cup D_+] \\ i \neq j, \forall j \in A \end{array} \quad (V.36)$$

$$c_i^f \leq 2 \quad \forall f \in F, \forall i \in [M \cup A \cup D_+] \quad (V.37)$$

$$c_i^f = 0 \quad \forall f \in F, \forall i \in D_- \quad (V.38)$$

$$\sum_{f \in F} y^f \geq N \quad (V.39)$$

$$y^f \in \{0,1\} \quad \forall f \in F \quad (V.40)$$

$$x_{ij}^f \in \{0,1\} \quad \forall i \in [M \cup A \cup D_+], \forall j \in [M \cup A \cup D_-], i \neq j, \forall f \in F \quad (V.41)$$

$$c_i^f \geq 0 \quad \forall i \in [M \cup A \cup D_+ \cup D_-], \forall f \in F \quad (V.42)$$

$$t_i^f \geq 0 \quad \forall i \in [M \cup A \cup D_+ \cup D_-], \forall f \in F \quad (V.43)$$

V.7 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Tabelle V.7: Einfluss des verwendeten Cluster-Radius

	N = 125 Q = 10 Cluster-Radius = 600 m			N = 87 Q = 10 Cluster-Radius = 800 m	
	Gemeinsam	Separat		Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	0	4	$\sum y_i^{\text{Charge}}$	0	4
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	2	1	$\sum y_i^{\text{Swap}}$	2	1
$\overline{r^q}$	129 kWh	146 kWh	$\overline{r^q}$	120 kWh	141 kWh
$\overline{h^q}$	1,0	0,3	$\overline{h^q}$	1,0	0,3
Zielfunktion	1.937.191 €	2.355.826 €	Zielfunktion	1.877.363 €	2.324.148 €
Synergie	418.635 € (17,77 %)		Synergie	446.784 € (19,22 %)	

	N = 41 Q = 10 Cluster-Radius = 1.200 m			N = 31 Q = 10 Cluster-Radius = 1.400 m	
	Gemeinsam	Separat		Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2	$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2	$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	130 kWh	143 kWh	$\overline{r^q}$	129 kWh	136 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8	$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.741.021 €	2.365.561 €	Zielfunktion	1.733.000 €	2.313.775 €
Synergie	624.540 € (26,40 %)		Synergie	580.776 € (25,10 %)	

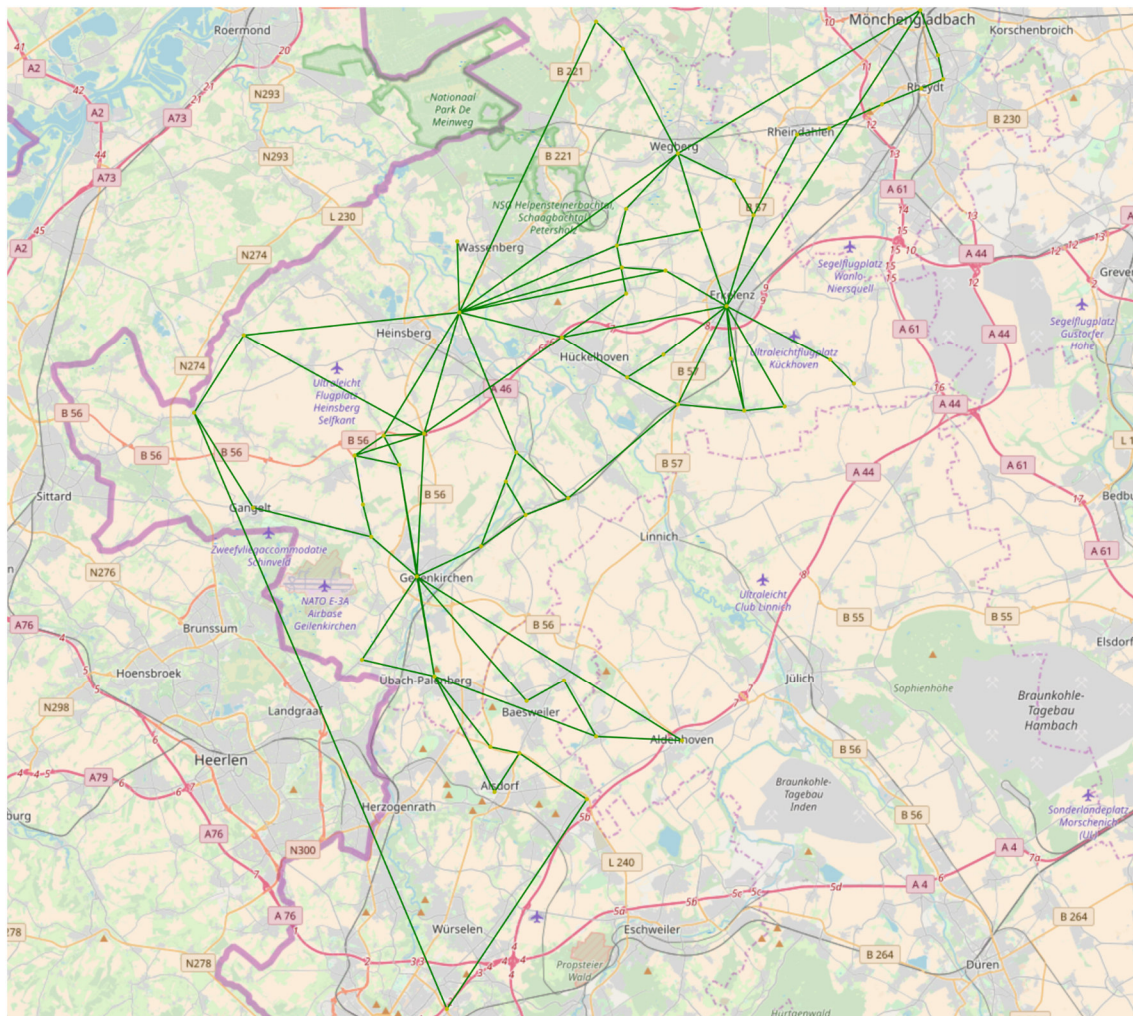


Abbildung V.6: Graph der Vergleichsmodellinstanz

Tabelle V.8: Einfluss variierender Fahrzeuganzahlen

	$ N = 69$	$ Q = 55$		$ N = 86$	$ Q = 28$
	Gemeinsam	Separat		Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	3	5	$\sum y_i^{\text{Charge}}$	2	3
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	1	$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	127 kWh	116 kWh	$\overline{r^q}$	119 kWh	150 kWh
$\overline{h^q}$	0,33	0,4	$\overline{h^q}$	0,8	0,7
Zielfunktion	5.376.350 €	6.009.369 €	Zielfunktion	3.265.620 €	4.181.288 €
Synergie	633.018 € (10,53 %)		Synergie	915.668 € (21,90 %)	

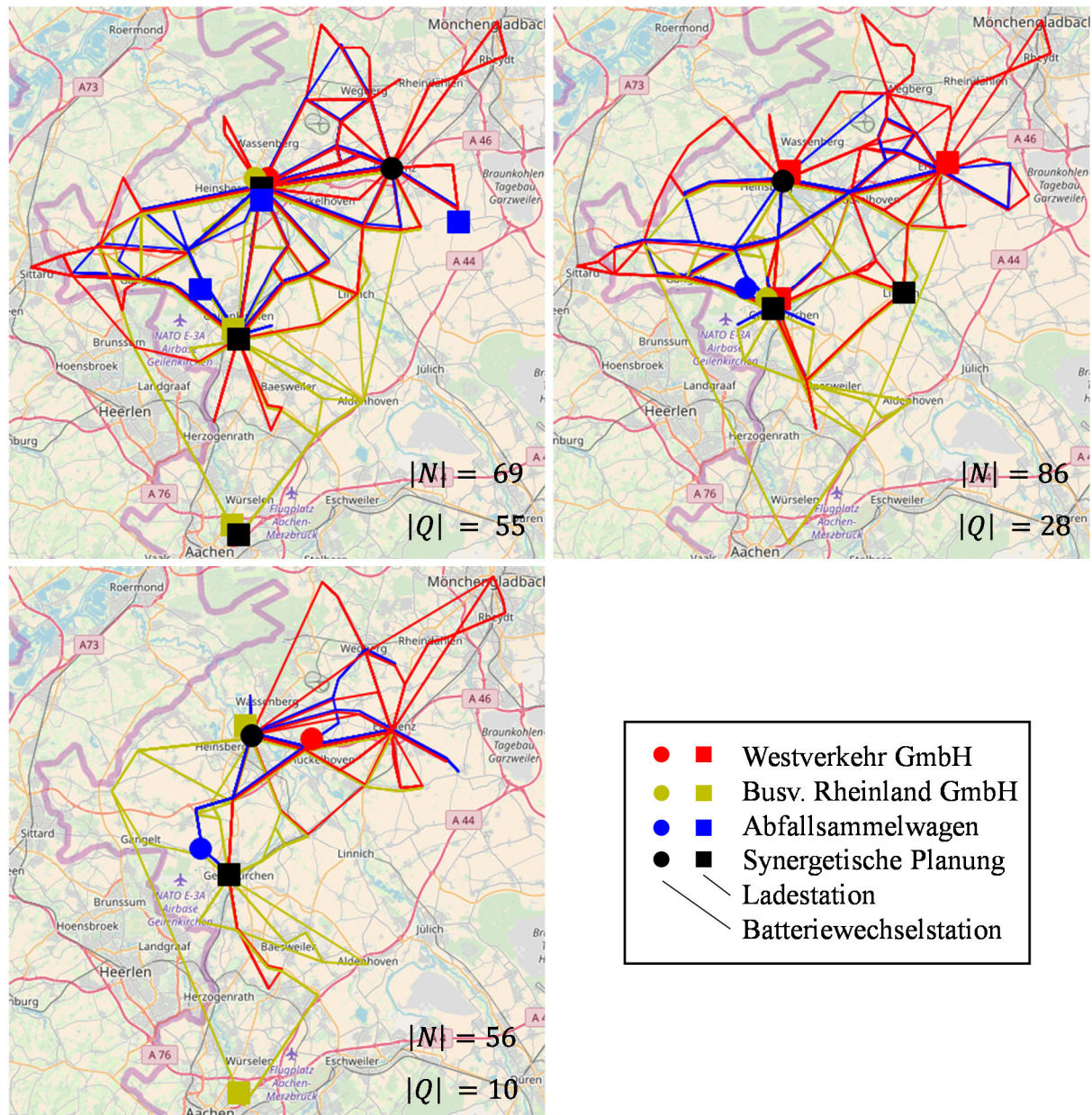


Abbildung V.7: Einfluss variierender Fahrzeuganzahlen

Tabelle V.9: Sensitivitätsanalyse sonstiger Parameter

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $C^{\text{Charge}} +10 \%$			$ N = 56 \quad Q = 10$ $C^{\text{Charge}} +20 \%$	
	Gemeinsam	Separat		Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	0	$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	0
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	3	$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	3
$\overline{r^q}$	137 kWh	129 kWh	$\overline{r^q}$	137 kWh	129 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	1,0	$\overline{h^q}$	0,9	1,0
Zielfunktion	1.816.548 €	2.368.369 €	Zielfunktion	1.840.347 €	2.368.369 €
Synergie	551.821 € (23,30 %)		Synergie	528.021 € (22,29 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $C^{\text{Charge}} -10 \%$			$ N = 56 \quad Q = 10$ $C^{\text{Charge}} -20 \%$	
	Gemeinsam	Separat		Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2	$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2	$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh	$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8	$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.768.948 €	2.298.468 €	Zielfunktion	1.745.148 €	2.250.868 €
Synergie	529.521 € (23,04 %)		Synergie	528.021 € (22,47 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $C^{\text{Swap}} +10 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.835.748 €	2.432.068 €
Synergie	596.321 € (24,52 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $C^{\text{Swap}} +20 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.878.848 €	2.518.068 €
Synergie	639.321 € (25,49 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $C^{\text{Swap}} -10 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	0
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	3
$\overline{r^q}$	137 kWh	129 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	1,0
Zielfunktion	1.749.748 €	2.239.369 €
Synergie	489.621 € (21,86 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $C^{\text{Swap}} -20 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	0
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	3
$\overline{r^q}$	137 kWh	129 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	1,0
Zielfunktion	1.706.748 €	2.110.369 €
Synergie	403.621 € (19,13 %)	

	N = 56 Q = 10 $C^{\text{Capacity}} +10\%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.861.723 €	2.417.075 €
Synergie	555.353 € (22,98 %)	

	N = 56 Q = 10 $C^{\text{Capacity}} +20\%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.930.697 €	2.488.082 €
Synergie	557.385 € (22,40 %)	

	N = 56 Q = 10 $C^{\text{Capacity}} -10\%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.723.773 €	2.275.061 €
Synergie	551.289 € (24,23 %)	

	N = 56 Q = 10 $C^{\text{Capacity}} -20\%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.654.798 €	2.204.055 €
Synergie	549.257 € (24,92 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $C_q^{\text{Swappable}} +10 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.836.278 €	2.376.068 €
Synergie	539.821 € (22,72 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $C_q^{\text{Swappable}} +20 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.879.748 €	2.406.068 €
Synergie	526.321 € (21,87 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $C_q^{\text{Swappable}} -10 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.749.248 €	2.316.068 €
Synergie	566.821 € (24,47 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $C_q^{\text{Swappable}} -20 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	0
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	3
$\overline{r^q}$	137 kWh	129 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	1,0
Zielfunktion	1.705.748 €	2.278.369 €
Synergie	572.621 € (25,13 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $U_{pi}^q + 10 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	147 kWh	151 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.860.256 €	2.421.098 €
Synergie	560.842 € (23,16 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $U_{pi}^q + 20 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	0
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	3
$\overline{r^q}$	156 kWh	148 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	1,0
Zielfunktion	1.927.764 €	2.485.645 €
Synergie	557.880 € (22,44 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $U_{pi}^q - 10 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	4
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	1
$\overline{r^q}$	128 kWh	130 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,3
Zielfunktion	1.725.239 €	2.242.421 €
Synergie	517.182 € (23,06 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $U_{pi}^q - 20 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	4
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	1
$\overline{r^q}$	119 kWh	120 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,3
Zielfunktion	1.657.731 €	2.167.774 €
Synergie	510.043 € (23,53 %)	

	N = 56 Q = 10 $E^q + 10\%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	4
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	1
$\overline{r^q}$	137 kWh	139 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,3
Zielfunktion	1.788.214 €	2.307.428 €
Synergie	519.214 € (22,50 %)	

	N = 56 Q = 10 $E^q + 20\%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	4
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	1
$\overline{r^q}$	136 kWh	138 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,3
Zielfunktion	1.783.681 €	2.297.788 €
Synergie	514.108 € (22,37 %)	

	N = 56 Q = 10 $E^q - 10\%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	138 kWh	142 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.797.281 €	2.355.709 €
Synergie	558.427 € (23,71 %)	

	N = 56 Q = 10 $E^q - 20\%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	0
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	3
$\overline{r^q}$	139 kWh	129 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	1,0
Zielfunktion	1.801.815 €	2.368.369 €
Synergie	566.554 € (23,92 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $R_{\max}^q + 10 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.792.748 €	2.346.068 €
Synergie	553.320 € (23,59 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $R_{\max}^q + 20 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.792.748 €	2.346.068 €
Synergie	514.108 € (23,59 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $R_{\max}^q - 10 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.792.748 €	2.346.068 €
Synergie	553.320 € (23,59 %)	

	$ N = 56 \quad Q = 10$ $R_{\max}^q - 20 \%$	
	Gemeinsam	Separat
$\sum y_i^{\text{Charge}}$	1	2
$\sum y_i^{\text{Swap}}$	1	2
$\overline{r^q}$	137 kWh	140 kWh
$\overline{h^q}$	0,9	0,8
Zielfunktion	1.792.748 €	2.346.068 €
Synergie	566.554 € (23,92 %)	

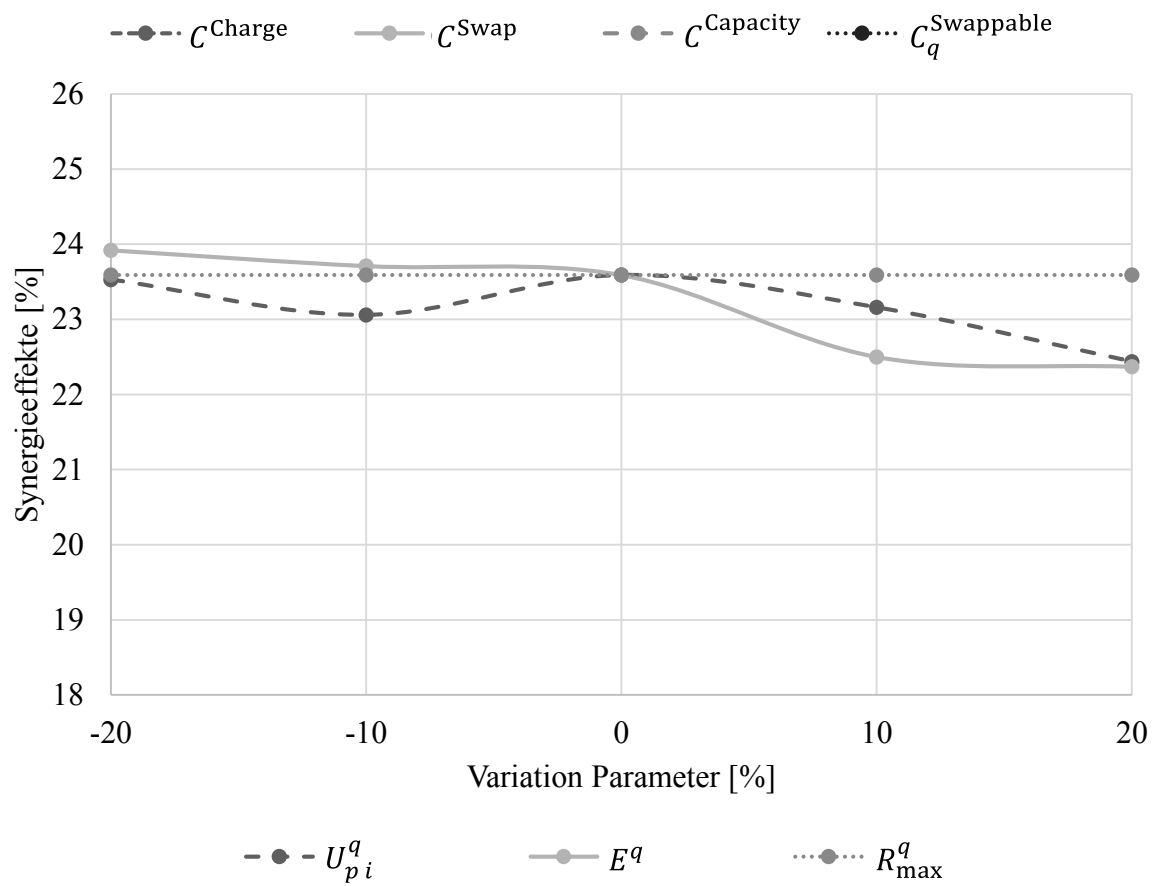
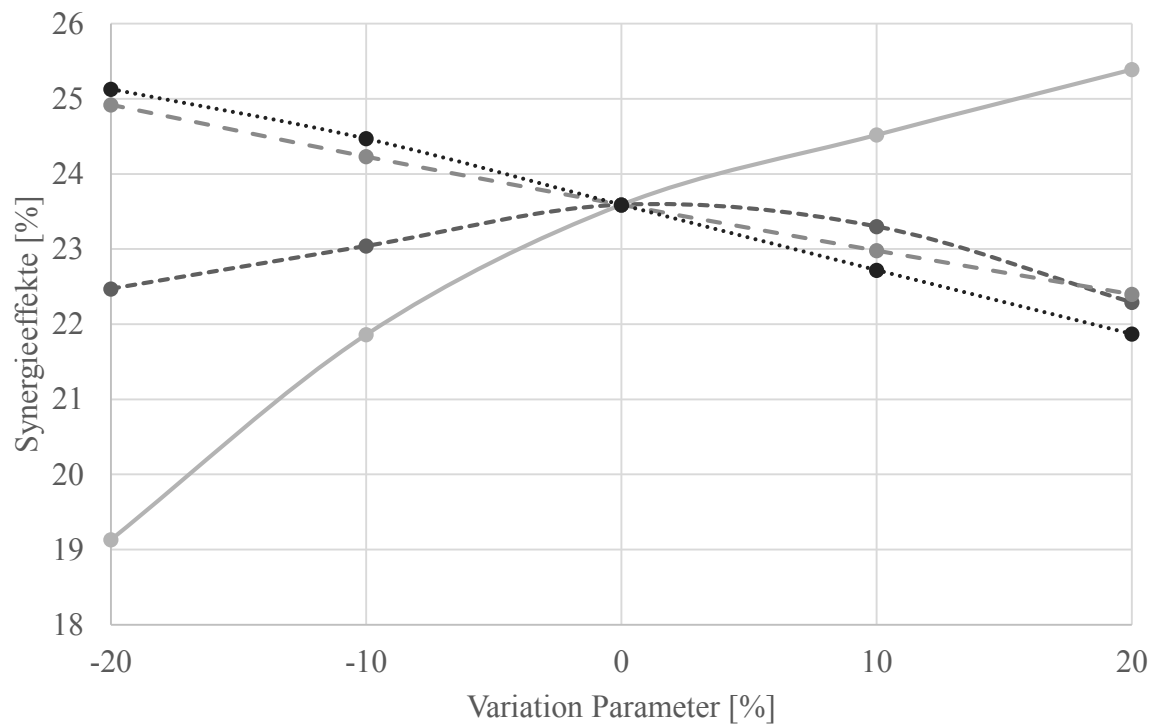


Abbildung V.8: Auswertung der Sensitivitätsanalyse

VI Literaturverzeichnis

- Aachener Verkehrsverbund* (Hg.) (2018): AVV OpenData. In: <http://opendata.avv.de/>, zuletzt geprüft am 16.07.2018.
- Aachener Zeitung* (Hg.) (2015): Kreis Heinsberg will „Modellkommune Pflege“ werden. In: <http://www.aachener-zeitung.de/lokales/kreis-heinsberg/kreis-heinsberg-will-modellkommune-pflege-werden-1.1225313>, zuletzt geprüft am 23.06.2018.
- Andrews, Matthew T; Dogru, Mustafa K; Hobby, John D; Tucci, Gabriel H; Jin, Yue* (2013): Modeling and Optimization for Electric Vehicle Charging Infrastructure: IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2013. Piscataway, NJ.
- apm³ GmbH* (Hg.) (2016): Fuhrpark und Mobilität - Elektroautos. In: <https://kommunalwirtschaft.eu/tagesanzeiger/detail/i13460/c000>, zuletzt geprüft am 03.07.2018.
- Badri-Koochi, B; Tavakkoli-Moghaddam, R.* (2012): Determining optimal number and locations of alternativefuel stations with a multi-criteria approach: Proceedings of the 8th International Industrial Engineering Conference.
- Barco, J; Guerra, A; Muñoz, L; Quijano, N.* (2017): Optimal Routing and Scheduling of Charge for Electric Vehicles: A Case Study. In: Mathematical Problems in Engineering 2017, S. 1–16.
- Becker, Josef* (2006): Umlaufplanung für den ÖV.
- Beltran, Borja; Carrese, Stefano; Cipriani, Ernesto; Petrelli, Marco* (2009): Transit network design with allocation of green vehicles: A genetic algorithm approach. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies 17, 5, S. 475–483.
- Berman, O.* (1997): Deterministic flow-demand location problems. In: Journal of the Operational Research Society 48, 1, S. 75–81.
- Berman, Oded; Bertsimas, Dimitris; Larson, Richard C.* (1995): Locating Discretionary Service Facilities, II: Maximizing Market Size, Minimizing Inconvenience. In: Operations Research 43, 4, S. 623–632.
- Berman, Oded; Larson, Richard C; Fouska, Nikoletta* (1992): Optimal Location of Discretionary Service Facilities. In: Transportation Science 26, 3, S. 201–211.

- Bertels, Stefan; Fahle, Torsten* (2006): A hybrid setup for a hybrid scenario: combining heuristics for the home health care problem. In: *Computers & Operations Research* 33, 10, S. 2866–2890.
- Bertels, Stefan; Fahle, Torsten; Hokemeier, Sven; Klomp, Hanno; Knauth, Peter; Rott, Matthias; Templin, Martina* (2003): Partizipative Personaleinsatzplanung für den Ambulanten Pflegedienst. Abschlussbericht des BMBF-Forschungsprojektes PAR-PAP. 1. Aufl. Lohmar: Eul.
- Bhatti, Shahzad F; Lim, Michael K; Mak, Ho-Yin* (2015): Alternative fuel station location model with demand learning. In: *Annals of Operations Research* 230, 1, S. 105–127.
- Bokinge, Ulf; Hasselström, Dick* (1980): Improved vehicle scheduling in public transport through systematic changes in the time-table. In: *European Journal of Operational Research* 5, 6, S. 388–395.
- Borndörfer, Ralf; Neumann, Marika; Pfetsch, Marc* (2008): Angebotsplanung im öffentlichen Nahverkehr. In: https://opus4.kobv.de/opus4-zib/files/1055/ZR_08_04.pdf.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur* (Hg.): Kommunale Flotte. In: http://www.xn--starterset-elektromobilitaet-4hc.de/Bausteine/Kommunale_Flotte, zuletzt geprüft am 30.05.2018.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur* (Hg.): Umweltzonen: Ein Beitrag für saubere Luft in den Innenstädten. In: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/umweltzonen-saubere-luft-in-den-innenstaedten.html>, zuletzt geprüft am 30.05.2018.
- Bundeszentrale für politische Bildung* (Hg.) (2009): Luftverschmutzung durch Industrie, Landwirtschaft und Haushalte. In: <http://www.bpb.de/gesellschaft/umwelt/dossier-umwelt/61246/luftverschmutzung?p=all>, zuletzt geprüft am 30.05.2018.
- Busverkehr Rheinland GmbH* (Hg.): Unsere Verkaufsstellen. In: <http://www.rheinlandbus.de/rheinlandbus/view/service/aachen.shtml>, zuletzt geprüft am 17.07.2018.
- Busverkehr Rheinland GmbH* (Hg.): Unternehmen - DB Rheinlandbus. In: <http://www.rheinlandbus.de/rheinlandbus/view/wir/unternehmen.shtml>, zuletzt geprüft am 17.07.2018.

- BYD* (Hg.): The battery that powers BYD cars, buses, and forklift trucks. In: <http://bydeurope.com/innovations/technology/index.php#charging>, zuletzt geprüft am 01.08.2018.
- Cai, Hua; Jia, Xiaoping; Chiu, Anthony S.F; Hu, Xiaojun; Xu, Ming* (2014): Siting public electric vehicle charging stations in Beijing using big-data informed travel patterns of the taxi fleet. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 33, S. 39–46. In: <http://www.sciencedirect.com/science/article>.
- Capar, Ismail; Kuby, Michael* (2012): An efficient formulation of the flow refueling location model for alternative-fuel stations. In: *IIE Transactions* 44, 8, S. 622–636.
- Capar, Ismail; Kuby, Michael; Leon, V. Jorge; Tsai, Yu-Jiun* (2013): An arc cover–path-cover formulation and strategic analysis of alternative-fuel station locations. In: *European Journal of Operational Research* 227, 1, S. 142–151.
- Chen, T. Donna; Kockelman, Kara M; Khan, Moby* (2013): Locating Electric Vehicle Charging Stations. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2385, 1, S. 28–36.
- Chen, Zhibin; Yin, Yafeng; Song, Ziqi* (2018): A Cost-Competitiveness Analysis of Charging Infrastructure for Electric Bus Operations: Transportation Research Board 97th Annual Meeting Transportation Research Board, S. 351–366.
- Cheng, Eddie; Rich, Jennifer Lynn* (1998): A Home Health Care Routing and Scheduling Problem.
- Chung, Sung Hoon; Kwon, Changhyun* (2015): Multi-period planning for electric car charging station locations: A case of Korean Expressways. In: *European Journal of Operational Research* 242, 2, S. 677–687.
- Daskin, Mark S.* (2008): What you should know about location modeling. In: *Naval Research Logistics* 55, 4, S. 283–294.
- Deutscher Städte- und Gemeindebund* (Hg.) (2017): Elektromobilität - Tipps für Kommunen. In: <https://kommunal.de/artikel/mobilitaet/>, zuletzt geprüft am 30.05.2018.
- Deutsches Rotes Kreuz* (Hg.): Pflegestufen. In: <http://drk-pflege-schwarzenbek.de/drk-pflegeteam/beratung-zur-pflegeversicherung/pflegestufen.html>, zuletzt geprüft am 23.06.2018.

- Dornbusch, Heinz-Josef* (2005): Grundsätzliche Anforderungen an eine moderne Abfallsammlung. In: Urban, Arnd I; Halm, Gerhard; Weber, Markus (Hg.): Optimierung der Abfall-Logistik: Kassler Abfall-Logistik-Tage. Kassel, S. 7–13. (Schriftenreihe des Fachgebiets Abfalltechnik. Universität Kassel.
- e.GO Mobile AG* (Hg.): e.GO Life. In: <http://e-go-mobile.com/de/modelle/e.go-life/>, zuletzt geprüft am 14.07.2018.
- ecomento.de* (Hg.) (2016): Elektroauto-Batterien noch zu schwer. In: <https://ecomento.de/2016/09/27/elektroauto-batterien-noch-zu-schwer/>, zuletzt geprüft am 01.08.2018.
- ecomento.de* (Hg.) (2017): BYD liefert Mega-Elektrobus mit 547kWh-Batterie und 440 Kilometern Reichweite aus. In: <https://ecomento.de/2017/05/19/byd-liefert-mega-elektrobus-mit-547-kwh-batterie-und-440-kilometern-reichweite-aus/>, zuletzt geprüft am 01.08.2018.
- Edlinger, Karl-Michael* (2011): Optimierung der periodischen Tourenplanung in der Müllentsorgung.
- Elektroauto-News.net* (Hg.) (2011): Renault Fluence Z.E. – Familientaugliche E-Limousine. In: <https://www.elektroauto-news.net/elektroautos/renault/renault-fluence-ze-familientaugliche-e-limousine>, zuletzt geprüft am 02.08.2018.
- ElektroMobilität NRW* (Hg.) (2016): Elektromobilität kurz erklärt. In: https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/broschuere_elektromobilitaet_kurz_erklaert_01.17.pdf, zuletzt geprüft am 05.06.2018.
- Fikar, Christian; Hirsch, Patrick* (2017): Home health care routing and scheduling: A review. In: *Computers & Operations Research* 77, S. 86–95.
- Gebhardt, Michael; Huber, Andreas; Holdenried, Elias; Hornig, Robin; Berndt, Katharina* (2018): Neuer Nissan Leaf fährt teilautonom. In: <http://www.autobild.de/artikel/nissan-leaf-2018-11768681.html>, zuletzt geprüft am 02.08.2018.
- Gesellschaft für Abfallwirtschaft und Stadtreinigung mbH* (Hg.) (2017): Beitrag des kommunalen Fuhrparks zur Verbesserung der Luftqualität. In: https://www.bast.de/BASSt_2017/DE/Verkehrstechnik/Publikationen/Veranstaltungen/V3-Luftqualitaet-2008/luftqualit%C3%A4t-vortrag-schroeer.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 25.04.2018.

- GoingElectric* (Hg.) (2013): BYD eBus stellt Reichweitenrekord auf. In: <https://www.goingelectric.de/2013/06/24/news/byd-ebus-rekord-310-km-reichweite/>, zuletzt geprüft am 31.07.2018.
- Handschuh, Alexander; Schermann, Andrea; Düsterdiek, Bernd; Fuchs, Timm* (November 2017): Elektromobilität bei kommunalen Nutzfahrzeugen: Deutscher Städte und Gemeindebund.
- Hermann, Christina* (2014): Die Kombinierte Touren- und Personal-Einsatzplanung von Pflegediensten.
- Hodgson, M. John* (1990): A Flow-Capturing Location-Allocation Model. In: *Geographical Analysis* 22, 3, S. 270–279.
- Hong, Insu; Kuby, Michael; Murray, Alan* (2017): A Deviation Flow Refueling Location Model for Continuous Space: A Commercial Drone Delivery System for Urban Areas. In: Griffith, Daniel A; Chun, Yongwan; Dean, Denis J. (Hg.): *Advances in Geocomputation: Geocomputation 2015--The 13th International Conference*. Geocomputation 2015--The 13th International Conference. Cham, s.l., S. 125–132. (Advances in Geographic Information Science).
- Hosseini, M; MirHassani, S. A; Hooshmand, F.* (2017): Deviation-flow refueling location problem with capacitated facilities: Model and algorithm. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 54, S. 269–281.
- Huang, Yongxi; Li, Shengyin; Qian, Zhen Sean* (2015): Optimal Deployment of Alternative Fueling Stations on Transportation Networks Considering Deviation Paths. In: *Networks and Spatial Economics* 15, 1, S. 183–204.
- Hwang, Seong Wook; Kweon, Sang Jin; Ventura, Jose A.* (2015): Infrastructure development for alternative fuel vehicles on a highway road system. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 77, S. 170–183.
- Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe an der RWTH Aachen* (Hg.) (2016): Angaben zu Elektrobussen – Code example. In: <http://ebuslcc.ebusplan.com/de/calculator/example/elektrobus/>, zuletzt geprüft am 13.07.2018.
- Ip, A; Fong, S; Liu, E.* (2010): Optimization for allocating BEV recharging stations in urban areas by using hierarchical clustering. In: Ko, Franz (Hg.): *6th International Conference on Advanced Information Management and Service (IMS), 2010: Nov. 30, 2010 - Dec. 2, 2010, Seoul, Korea; with ICMLA 2010, 2nd International Conference on*

- Data Mining and Intelligent Information Technology Applications; proceeding.* Nov. 30, 2010 - Dec. 2, 2010, Seoul, Korea; with ICMIA 2010, 2nd International Conference on Data Mining and Intelligent Information Technology Applications; proceeding. Piscataway, NJ, S. 460–465.
- Jiang, Yunjian; Zhang, Yong; Zhang, Cong; Fan, Jiaqing* (2012): Capacitated Deviation-Flow Fueling Location Model for Sitting Battery Charging Stations. In: Fang, Fang "C."; Wei, Heng; Wang, Yunpeng; Zhang, Jun (Hg.): *Cictp 2012: Multimodal transportation systems convenient, safe, cost-effective*. Multimodal transportation systems convenient, safe, cost-effective. [Place of publication not identified], S. 2771–2778.
- John Hodgson, M.* (1981): The location of public facilities intermediate to the journey to work. In: *European Journal of Operational Research* 6, 2, S. 199–204.
- John Hodgson, M; Rosing, K. E; Leontien, A; Storrier, G.* (1996): Applying the flow-capturing location-allocation model to an authentic network: Edmonton, Canada. In: *European Journal of Operational Research* 90, 3, S. 427–443.
- Kilimann, Susanne* (2015): Elektromobilität: Neue Busse braucht das Land. In: <https://www.zeit.de/mobilitaet/2015-09/elektrobus-berlin-braunschweig>, zuletzt geprüft am 04.07.2018.
- Kim, Jong-Geun; Kuby, Michael* (2012): The deviation-flow refueling location model for optimizing a network of refueling stations. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 37, 6, S. 5406–5420.
- Kim, Jong-Geun; Kuby, Michael* (2013): A network transformation heuristic approach for the deviation flow refueling location model. In: *Computers & Operations Research* 40, 4, S. 1122–1131.
- Kliwer, Natalia* (2005): Optimierung des Fahrzeugeinsatzes im öffentlichen Personennahverkehr.
- Knote, Thoralf; Haufe, Beate; Saroch, Lars* (2017): Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse. In: https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-04/Abschlussbericht_E-Bus-Standard.pdf, zuletzt geprüft am 02.08.2018.
- Ko, Joonho; Gim, Tae-Hyoung Tommy; Guensler, Randall* (2017): Locating refuelling stations for alternative fuel vehicles: a review on models and applications. In: *Transport Reviews* 37, 5, S. 551–570.

- Kreis Heinsberg* (Hg.): Abfall-Entsorgungsanlagen im Kreis Heinsberg. In:
<https://www.kreis-heinsberg.de/buergerservice/schlagwortindex/?ID=519>, zuletzt geprüft am 17.06.2018.
- Kreis Heinsberg* (Hg.) (2016): Siedlungsabfallbilanz im Kreis Heinsberg für das Jahr 2016.
In: <https://www.kreis-heinsberg.de/buergerservice/schlagwortindex/?ID=412>, zuletzt geprüft am 11.05.2018.
- Kreis Heinsberg* (Hg.) (2018): Ambulante Pflegedienste im Kreis Heinsberg. In:
<https://www.kreis-heinsberg.de/buergerservice/formulare-dokumente/?ID=188&PHPSESSID=08e755a0116b8b6042127e81a2b94ca3>, zuletzt geprüft am 24.06.2018.
- Kuby, Michael; Lim, Seow* (2005): The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles. In: *Socio-Economic Planning Sciences* 39, 2, S. 125–145.
- Kuby, Michael; Lim, Seow* (2007): Location of Alternative-Fuel Stations Using the Flow-Refueling Location Model and Dispersion of Candidate Sites on Arcs. In: *Networks and Spatial Economics* 7, 2, S. 129–152.
- Kweon, Sang Jin; Hwang, Seong Wook; Ventura, Jose A.* (2017): A Continuous Deviation-Flow Location Problem for an Alternative-Fuel Refueling Station on a Tree-Like Transportation Network. In: *Journal of Advanced Transportation* 2017, S. 1–20.
- Leßner, Armin* (Mai 2018): Die Gretchenfrage der Ladestrategie. In: *ZfK - Zeitung für kommunale Wirtschaft*, S. 20.
- Lim, Seow; Kuby, Michael* (2010): Heuristic algorithms for siting alternative-fuel stations using the Flow-Refueling Location Model. In: *European Journal of Operational Research* 204, 1, S. 51–61.
- Lin, Zhenhong; Ogden, Joan; Fan, Yueyue; Chen, Chien-Wei* (2008): The fuel-travel-back approach to hydrogen station siting. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 33, 12, S. 3096–3101.
- Liu, Ran; Yuan, Biao; Jiang, Zhibin* (2017): Mathematical model and exact algorithm for the home care worker scheduling and routing problem with lunch break requirements. In: *International Journal of Production Research* 55, 2, S. 558–575.

- Mehar, Sara; Senouci, Sidi Mohammed* (2013): An optimization location scheme for electric charging stations: International Conference on Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT), S. 1–5.
- Miralinaghi, Mohammad; Lou, Yingyan; Keskin, Burcu B; Zarrinmehr, Amirali; Shabanpour, Ramin* (2017): Refueling station location problem with traffic deviation considering route choice and demand uncertainty. In: International Journal of Hydrogen Energy 42, 5, S. 3335–3351.
- MirHassani, S. A; Ebrazi, R.* (2013): A Flexible Reformulation of the Refueling Station Location Problem. In: Transportation Science 47, 4, S. 617–628.
- Nicholas, Michael; Handy, Susan; Sperling, Daniel* (2004): Using Geographic Information Systems to Evaluate Siting and Networks of Hydrogen Stations. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1880, S. 126–134.
- Nicholas, Michael; Ogden, Joan* (2006): Detailed Analysis of Urban Station Siting for California Hydrogen Highway Network. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1983, S. 121–128.
- Nie, Yu; Ghamami, Mehrnaz* (2013): A corridor-centric approach to planning electric vehicle charging infrastructure. In: Transportation Research Part B: Methodological 57, S. 172–190.
- Nieß, Franziska* (2016): Pflegedienste: Wo sich E-Autos lohnen. In: <https://www.firmen-auto.de/pflegedienste-wo-sich-e-au-lohnen-7499313.html>, zuletzt geprüft am 28.04.2018.
- Paz, Juan C; Granada-Echeverri, Mauricio; Willmer Escobar, John* (2018): The multi-depot electric vehicle location routing problem with time windows. In: International Journal of Industrial Engineering Computations, S. 123–136.
- Project OSRM* (Hg.): Open Source Routing Machine. In: <http://project-osrm.org/>, zuletzt geprüft am 12.07.2018.
- Scheiper, Barbara; Schiffer, Maximilian; Walther, Grit* (2018): The flow refueling location problem with load flow control. In: Omega, S.1–20.
- Schiffer, Maximilian; Walther, Grit* (2017): The electric location routing problem with time windows and partial recharging. In: European Journal of Operational Research 260, 3, S. 995–1013.

- Schlesinger, Susanne*: Auswirkungen von Umweltzonen. In: <http://de.urbanaccessregulations.eu/low-emission-zones-main/impact-of-low-emission-zones>, zuletzt geprüft am 05.06.2018.
- Schmidt, Thomas J.* (2018): FES testet ab Sommer dieselfreies Müllauto. In: <http://www.fnp.de/lokales/frankfurt/FES-testet-ab-Sommer-dieselfreies-Muell-auto;art675,2997161>, zuletzt geprüft am 13.06.2018.
- Schneider, Adam* (2018): GPS Visualizer's Easy Batch Geocoder: Convert addresses to coordinates. In: <http://www.gpsvisualizer.com/geocoder/>, zuletzt geprüft am 24.06.2018.
- Schöbel, Anita* (2017): An eigenmodel for iterative line planning, timetabling and vehicle scheduling in public transportation. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 74, S. 348–365.
- Schönmackers GmbH* (Hg.): Standorte-Schönmackers in NRW. In: <https://www.schoenmackers.de/ueber-uns/standorte/>, zuletzt geprüft am 17.06.2018.
- Schönmackers GmbH* (Hg.) (2018): Abfallkalender. In: <https://www.schoenmackers.de/rundum-service/abfallkalender/>, zuletzt geprüft am 17.06.2018.
- Stadtverwaltung Heinsberg* (Hg.) (2017): Abfallkalender Heinsberg 2017. In: http://www.heinsberg.de/formulare/amt60/abfallkalender_2017.pdf, zuletzt geprüft am 11.05.2018.
- Statistisches Bundesamt* (Hg.) (2017): Pflegestatistik 2015. In: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Gesundheit/Pflege/LaenderAmbulantePflegedienste5224101159004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 23.06.2018.
- Südwestrundfunk* (Hg.) (2007): Luftschadstoffe: Stickoxide - welchen Anteil hat der Verkehr? In: <https://www.swr.de/abgasalarm/luftschadstoffe-stickoxide-welchen-anteil-hat-der-verkehr/-/id=18988100/did=20682692/nid=18988100/ai23qt/index.html>, zuletzt geprüft am 30.05.2018.
- tagesschau.de* (Hg.) (2018): Zahl der Einwohner Deutschlands gestiegen. In: <https://www.tagesschau.de/inland/einwohnerzahl-deutschland-107.html>, zuletzt geprüft am 28.04.2018.
- Toth, Zita* (Februar 2007): Kennzahlen zur Unterstützung der Planung und Optimierung der Entsorgungslogistik, zuletzt geprüft am 23.06.2018. In: <https://dnb.info/990768163/34>.

- Tran, Trung H; Nagy, Gábor; Nguyen, Thu B. T; Wassan, Niaz A.* (2017): An efficient heuristic algorithm for the alternative-fuel station location problem. In: *European Journal of Operational Research*.
- Umweltbundesamt* (Hg.) (2014): Luftreinhalteung in der EU. In: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/regelungen-strategien/luftreinhalteung-in-der-eu#textpart-1>, zuletzt geprüft am 30.05.2018.
- Umweltbundesamt* (Hg.) (2017): Gesundheitsrisiken der Bevölkerung durch Feinstaub. In: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-der-bevoelkerung-durch-feinstaub#textpart-1>, zuletzt geprüft am 05.06.2018.
- Upchurch, Christopher; Kuby, Michael* (2010): Comparing the p-median and flow-refueling models for locating alternative-fuel stations. In: *Journal of Transport Geography* 18, 6, S. 750–758.
- Upchurch, Christopher; Kuby, Michael; Lim, Seow* (2009): A Model for Location of Capacitated Alternative-Fuel Stations. In: *Geographical Analysis* 41, 1, S. 85–106.
- Verband der Arbeitsgeräte- und* (Hg.): AG Abfallsammelfahrzeuge. In: <http://www.vak-ev.de/de/mitglieder/abfallsammelfahrzeuge>, zuletzt geprüft am 25.04.2018.
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V.* (Hg.) (2015): Statistik. In: <https://www.vdv.de/statistik-2015.pdf?forced=true>, zuletzt geprüft am 15.08.2018.
- Vincentz Network GmbH & Co. KG* (Hg.) (2014): Wie Pflegedienste Touren ergebnisorientiert planen. In: <http://www.haeusliche-pflege.net/Infopool/Nachrichten/Management/Wie-Pflegedienste-Touren-ergebnisorientiert-planen>, zuletzt geprüft am 28.04.2018.
- Vries, Harwin de; Duijzer, Evelot* (2017): Incorporating driving range variability in network design for refueling facilities. In: *Omega* 69, S. 102–114.
- Wang, Ying-Wei; Lin, Chuah-Chih* (2009): Locating road-vehicle refueling stations. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 45, 5, S. 821–829.
- Wang, Ying-Wei; Lin, Chuah-Chih* (2013): Locating multiple types of recharging stations for battery-powered electric vehicle transport. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 58, S. 76–87.

- Wang, Ying-Wei; Wang, Chuan-Ren* (2010): Locating passenger vehicle refueling stations. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 46, 5, S. 791–801.
- WestVerkehr GmbH* (Hg.) (2015): Wir über uns. In: <http://west-verkehr.de/index.php/de/2015-03-05-16-04-47/west-verkehr>, zuletzt geprüft am 17.07.2018.
- Yang, Jun; Sun, Hao* (2015): Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles. In: *Computers & Operations Research* 55, S. 217–232. In: <http://www.sciencedirect.com/science/article>.
- Yıldız, Barış; Arslan, Okan; Karaşan, Oya Ekin* (2016): A branch and price approach for routing and refueling station location model. In: *European Journal of Operational Research* 248, 3, S. 815–826.
- Zeit Online* (Hg.) (2017): Welche Folgen Stickoxide für unsere Gesundheit haben. In: <https://www.zeit.de/news/2017-04/25/verkehr-welche-folgen-stickoxide-fuer-unsere-gesundheit-haben-25132411>, zuletzt geprüft am 05.06.2018.
- Zeit Online* (Hg.) (2018): Luftverschmutzung: EU-Kommission verklagt Deutschland wegen Luftverschmutzung. In: <https://www.zeit.de/mobilitaet/2018-05/eu-kommission-verklagt-deutschland-wegen-luftverschmutzung>, zuletzt geprüft am 30.05.2018.
- Zockaie, Ali; Aashtiani, Hedayat Z; Ghamami, Mehrnaz; Marco Nie, Yu* (2016): Solving Detour-Based Fuel Stations Location Problems. In: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 31, 2, S. 132–144.

VII Eidesstattliche Versicherung

Diese Seite entfernen und den Vordruck für die eidesstattliche Versicherung einfügen.