



Master Thesis

im Rahmen des Universitätslehrganges
„Geographical Information Science & Systems“ (UNIGIS MSc)
am Zentrum für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

Standortoptimierung in Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge im Flottenbetrieb

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (BA)

Karl-Heinz Böhm

U1536, UNIGIS MSc Jahrgang 2010

Zur Erlangung des Grades

„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc (GIS)“

Gutachter:

Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Bad Lippspringe, 22.07.2012

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei denen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Master Thesis unterstützt haben.

Mein Dank geht zunächst an Dr. Thomas Bierhoff vom C-LAB Paderborn für die herausfordernde und aktuelle Themenstellung sowie die konstruktiven Rückfragen und Anregungen.

Herzlichen Dank auch an das UNIGIS-Team der Universität Salzburg für die Reflexion und Schärfung der Aufgabenstellung und die gute Betreuung während der gesamten Studienzeit.

Das Vorhaben *Fernstudium statt Fernsehen* wäre allerdings ohne die beharrliche Unterstützung meiner Frau Ines-Yvonne wohl nicht umsetzbar gewesen, da insbesondere die Master Thesis gewissermaßen nach Art eines idealen Gases nahezu alle Freizeit ausgefüllt hat...

Vielen Dank, Ines!

Erklärung der eigenständigen Abfassung der Arbeit

Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

Bad Lippspringe, 22.07.2012

eigenhändige Unterschrift

Kurzfassung

Die Herausforderungen des Klimawandels und die zunehmende Verknappung und Verteuerung fossiler Brennstoffe stellen besondere Anforderungen an die Zukunft der Mobilität. Ein häufig genanntes Ziel ist die Begrenzung der Emissionen von klimaschädlichen Gasen, ohne jedoch auf weiteres Wachstum verzichten zu müssen.

Betrachtet man hier Fahrzeugflotten im öffentlichen und privaten Sektor, so kann der Umstieg von Verbrennungsmotoren auf elektrische Antriebe eine Perspektive sein. Es gibt allerdings technische Rahmenbedingungen, insbesondere die vergleichsweise geringe Reichweite und den hohen Ladezeitbedarf von batteriegetriebenen Elektrofahrzeugen, die den Umstieg erschweren. Der bedarfsgerechte und kostengünstige Aufbau von Ladeinfrastrukturen nimmt eine Schlüsselrolle für den erfolgreichen Wechsel hin zu Elektrofahrzeugen ein.

Diese Thesis erarbeitet ein Verfahren zur kostenoptimierten Standortplanung von Ladestationen für Fahrzeuge im Flottenbetrieb und stellt vor, wie eine prototypische Arbeitsplattform zur Anwendung in konkreten Szenarien aufgebaut werden kann. Zunächst wird ein mathematisches Optimierungsmodell aufgestellt, das dann in Form einer Erweiterungskomponente für das Geoinformationssystem ESRI ArcGIS Desktop implementiert und integriert wird. Das Verfahren und die Erweiterungskomponente werden schließlich im Szenario eines Großflughafens erprobt, bei dem Teile der Betriebsflotte auf Elektroantrieb umgestellt werden sollen.

Die Arbeit zeigt, dass Methoden des Operations Research und die verfügbare Technologie von Geoinformationssystemen sich gegenseitig ergänzend wertvolle Hilfestellung bei der Planung von Ladeinfrastrukturen leisten.

Abstract

Climate change and increasing scarcity of mineral fuels are the major challenges for the future of mobility. Limiting the emissions of gases harmful to the climate without giving up profitable growth is a goal often heard of.

If we look at vehicle fleets in public and private sectors, a change from combustion engines to electric drivetrains may offer a vision to accomplish this goal. Technical constraints like maximum range and charge time impede the change towards electric vehicles. Charging infrastructures that are both cost-effective and in line with the demand will play the key role in a successful change.

This thesis compiles a process for cost-optimized facility location planning of charging devices for fleet-operated vehicles and introduces a prototypical platform that can be used in real scenarios. First, a mathematical optimization model is developed which is then integrated as an add-in to the ESRI ArcGIS Desktop geoinformation system. Both the process and the add-in are finally tested in a scenario of a major airport facing a change to electrical vehicles for parts of its ground services.

The thesis illustrates, that methods from operations research combined with current technology of geoinformation systems give a valuable asset to the planning of charging infrastructures.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	2
Erklärung der eigenständigen Abfassung der Arbeit.....	3
Kurzfassung.....	4
Abstract.....	5
Inhaltsverzeichnis.....	6
1 Einführung.....	9
1.1 Motivation.....	10
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	11
1.3 Hypothesen und zu verifizierende Aussagen.....	11
1.4 Angestrebte Ergebnisse.....	12
1.5 Abgrenzung und nicht behandelte Themen.....	12
1.6 Struktur der Thesis.....	13
2 Definition der Problemstellung.....	15
2.1 Kontext und grundlegende Fragestellung.....	15
2.2 Relevante Objekte und Begriffe.....	18
2.3 Struktur und Ergebnis der Lösungssuche.....	22
2.4 Zusammenfassung.....	25
3 Literaturstudie und verfügbare Technologie.....	27
3.1 Überblick.....	27
3.2 Optimierungssysteme und Operations Research.....	28
3.3 Standortanalyse und Standortoptimierung.....	31
3.4 Routenfindung und Tourenplanung.....	37
3.5 Standortplanung mit einem Geoinformationssystem.....	40
3.6 Schlussfolgerungen und Lösungsidee.....	44
4 Implementierung und Integration der Lösung.....	45
4.1 Architekturübersicht.....	45
4.2 Mathematisches Optimierungsmodell LFRS.....	47

4.3	Formulierung des LFRS als OPL-Model	52
4.4	ArcGIS Desktop AddIn LARS	56
4.5	Struktur und Inhalt der Geodatabase.....	59
4.6	Generisches Vorgehensmodell.....	60
4.7	Kriterien zur Verifikation der Ergebnisse.....	62
5	Anwendung im Szenario Großflughafen	64
5.1	Motivation und Überblick.....	64
5.2	Geodaten	65
5.3	Bedarfsstruktur und Tourenplanung	68
5.4	Suche der optimalen Standorte für Ladestationen	78
5.5	Laufzeitbetrachtung	88
5.6	Zusammenfassung.....	89
6	Fazit und Ausblick	90
	Abkürzungsverzeichnis	93
	Tabellenverzeichnis	94
	Formeln und Abbildungen.....	95
	Literaturverzeichnis	97
	Index	101

„Technologischer Wandel erfolgt nicht durch Revolution, sondern durch Evolution, durch unendlich viele kleine Schritte, die man stetig tun muss.“

Heinz Nixdorf

1 Einführung

Die Geschichte der Elektromobilität reicht zurück bis in das 19. Jahrhundert. Bereits fünf Jahre vor der Geburtsstunde des ersten fossil betriebenen Automobils von Carl Benz stellte Gustave Trouvé im Jahre 1881 auf der *Exposition d'Electricité* in Paris das erste Elektroauto vor.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts übertraf die Anzahl elektrisch angetriebener Fahrzeuge auf den Straßen die Anzahl der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren bei weitem. Insbesondere die geringen Reichweiten der Elektrofahrzeuge sowie weitere Nachteile der verfügbaren Batterietechnologie wie hohe Herstellungskosten bei geringer Lebensdauer und die große Anfälligkeit gegen Erschütterungen führten jedoch rasch zur Ernüchterung.

Bedeutende technologische Fortschritte verhalfen dem Verbrennungsmotor dann zum Durchbruch. Hier ist neben der verbesserten Leistung und Effizienz der Verbrennungsmotoren kurioserweise auch die Einführung des *elektrischen* Anlassers zu nennen. Es kam in der Folge zu einem raschen Aufbau der Infrastruktur zur Treibstoffversorgung – aber auf der anderen Seite auch zur Stagnation der Weiterentwicklung in allen Bereichen der Elektromobilität.

Die Herausforderungen des Klimawandels und die Verknappung fossiler Ressourcen führen – gepaart mit den inzwischen erreichten Fortschritten in der Batterietechnologie – derzeit zu einer wahren Renaissance der Elektromobilität.

Besondere Bedeutung kommt in den nächsten Jahren und Jahrzehnten dem bedarfsge rechten Ausbau der Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge zu. Diese Thesis zeigt auf, wie der Einsatz von Geoinformationssystemen die Planung von Ladeinfrastrukturen wirkungsvoll unterstützen kann.

1.1 Motivation

Die Forderung nach Minderung der Treibhausgasemissionen ist fester Bestandteil nationaler und internationaler Klimaschutzprogramme. Im Kyoto-Protokoll von 1997 verpflichteten sich zahlreiche Industriestaaten verbindlich dazu, den Ausstoß von Treibhausgasen – darunter Kohlendioxid (CO₂) – unter das Niveau von 1990 zu senken (vgl. [BMU 2001, S. 3 f.]).

Vor diesem Hintergrund ergibt sich unter vielen anderen auch die Fragestellung, wie der CO₂-Ausstoß von Fahrzeugflotten des öffentlichen und privaten Sektors reduziert oder zumindest begrenzt werden kann.

Die zu betrachtenden Fahrzeugflotten sind nach Einsatzgebiet und Art der Fahrzeuge vielfältig. Als Beispiele können Kurierdienste, Öffentliche Verkehrsmittel, Car-Sharing-Unternehmen und Betriebs- und Versorgungsfahrzeuge an Flughäfen angeführt werden.

Die Umstellung von Flottenfahrzeugen auf Elektroantrieb ist geeignet, den lokalen CO₂-Ausstoß zu reduzieren. Dies wird in vielen Fällen auch die einzige Möglichkeit eines CO₂-neutralen Wachstums sein, bei dem ein wirtschaftlicher Zugewinn ohne Mehrausstoß des Klimagases stattfinden kann. In genau dieser herausfordernden Situation befinden sich derzeit viele Großflughäfen im In- und Ausland.

Neben der Reduktion des CO₂-Ausstoßes kommt in zunehmendem Maße auch die Begrenzung der Betriebskosten als Motivationsfaktor hinzu, da die Kosten für fossile Brennstoffe rasant ansteigen während die Kosten für leistungsfähige Batterien und die elektrischen Fahrzeuge selbst eher fallen.

Die Umrüstung von Fahrzeugflotten auf Elektroantrieb ist im Wesentlichen von folgenden Problematiken geprägt:

- Batteriegetriebene Elektrofahrzeuge haben eine deutlich geringere Reichweite als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.
- Der Zeitbedarf für Ladevorgänge ist erheblich höher als der für das Nachtanken von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren.
- Die Infrastruktur zum Laden der Elektrofahrzeuge ist auf- bzw. auszubauen. Sie muss engmaschiger sein als bei konventionellen Antrieben. Dies verursacht hohe Kosten.
- Es existieren bereits Bedarfsstrukturen und Versorgungsziele, deren Erfüllung durch die Umstellung möglichst nicht beeinträchtigt werden darf.

Daraus ergibt sich im Kern die Fragestellung, an welchen Orten wie viele geeignete Lademöglichkeiten verfügbar gemacht werden müssen, um die Versorgungsziele auch mit Elektrofahrzeugen erfüllen zu können. Als wesentliche Randbedingung gehen in diese Fragestellung die Kosten für die Bereitstellung von Ladestationen ein. Die Bereit-

stellung kann dabei durch Neuerrichtung oder in Form vertraglich geregelter Zugangsberechtigung für bestehende Infrastruktur erfolgen.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Diese Master Thesis erarbeitet ein allgemeingültiges Verfahren zur Standortoptimierung für Ladesäulen für Elektrofahrzeuge im Flottenbetrieb.

Das Verfahren wird prototypisch und werkzeuggestützt so umgesetzt, dass es bei der Planung von Ladeinfrastrukturen als Plattform für die Abbildung konkreter Szenarien einsetzbar ist. Im Kontext der Szenarien sollen insbesondere Experimente mit unterschiedlichen technischen Randbedingungen (z.B. unterschiedliche Ladezeiten und Batteriekapazitäten) auf einfache Weise durchgeführt werden können. Die Erprobung und Validierung des Verfahrens erfolgt am Beispiel eines Großflughafens, an dem Teile der Betriebsflotten auf Elektroantrieb umgestellt werden sollen.

Das Hauptergebnis ist die Errechnung der minimal benötigten Anzahl von Ladesäulen und die Bestimmung der besten Aufstellungsorte aus der Menge der möglichen Standorte. Dabei gilt es, die kostengünstigste Lösung zu finden.

Zielpublikum dieser Thesis sind zum einen die Anbieter von komplexen Beratungsdienstleistungen im Umfeld der Elektromobilität. Hier erkennen insbesondere Unternehmen aus der Informationstechnologie, wie zum Beispiel die Atos IT Solutions and Services GmbH, derzeit wachsenden Bedarf an technischen Dienstleistungen für Kunden aus dem Industriebereich. Darüber hinaus wird diese Arbeit zum anderen für Vertriebs- und Planungsabteilungen der Hersteller von Ladeinfrastrukturen sowie für Flottenbetreiber von Interesse sein.

1.3 Hypothesen und zu verifizierende Aussagen

Ausgangshypothese der Arbeit ist, dass die Modelle, Methoden und Algorithmen aus dem Gebiet des Operations Research (OR) die Auffindung der gesuchten kostenoptimalen Lösungen ermöglichen. Hier gilt die besondere Aufmerksamkeit den beiden Methodengruppen Standortsuche und -optimierung sowie Tourenplanung.

Weiterhin ist zu prüfen, ob marktführende Geoinformationssysteme (GIS) bereits Lösungen für bestimmte Standortoptimierungsprobleme implementieren, die die Ausgestaltung des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens unterstützen sowie dessen Umsetzung und Durchführung vereinfachen.

Darüber hinaus gilt es nachzuweisen, dass ein GIS in der betrachteten Problemstellung als tragfähiger Rahmen für die Erhebung und Speicherung von raumbezogenen Daten

nutzbar ist, die Einbindung selbstentwickelter Lösungskomponenten vereinfacht sowie Funktionen für die ansprechende Visualisierung der Ergebnisse bereitstellt.

Es steht zu erwarten, dass die Besonderheiten des Kontextes Elektromobilität mindestens zu parameterseitigen Anpassungen der vom Geoinformationssystem bereitgestellten Funktionalitäten zur Standortoptimierung führen. Sehr wahrscheinlich sind aber alternative Modellierungen und die Implementierung neuer Komponenten nötig.

1.4 Angestrebte Ergebnisse

Das Gesamtergebnis der Arbeit ist eine prototypische, GIS-basierte Arbeitsumgebung im Sinne einer Werkbank, die auf konkrete Szenarien angewendet werden kann und in der die Standortoptimierung für Ladesäulen als generisches Verfahren integriert ist.

Zunächst ist zu prüfen, ob und an welchen Stellen Erweiterungen und Anpassungen vorhandener Methoden, Werkzeuge und Produktkomponenten vorgenommen werden müssen, um die spezifischen Anforderungen im Kontext Elektromobilität und Flottenbetrieb angemessen zu berücksichtigen. Die sich hieraus ergebenden Erkenntnisse erfordern gegebenenfalls die Entwicklung eigener Modelle und Lösungsmethoden sowie deren Implementierung und Integration.

Die detaillierte Beschreibung des Einsatzes der Arbeitsumgebung in einem konkreten Szenario beleuchtet alle wichtigen Aspekte wie die Versorgung mit raumbezogenen und attributiven Daten, Parametrisierung, Lösungssuche und die Durchführung von Experimenten mit Parametervariation.

Ebenso sind die kartografische Visualisierung der ermittelten optimalen Standorte für Ladesäulen sowie Aussagen zur Qualität der ermittelten Lösungen wichtige Ergebnisse dieser Arbeit.

1.5 Abgrenzung und nicht behandelte Themen

Diese Arbeit konzentriert sich auf Standortoptimierungsfragen. Auf die unterschiedlichen Ansätze von Geschäftsmodellen für Ladeinfrastrukturen wird nicht im Detail eingegangen. Es erfolgt keine umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (z.B. TCO, Opex) für die vollständige oder partielle Umstellung auf Elektroantrieb. Betrachtet werden ausschließlich die Kosten für Ladestationen.

Elektrische Kenngrößen wie Leistung, Ladestrom und -spannung, Verbindungselemente und deren Normierung, Ladekurven und sonstige Batterieeigenschaften stehen nicht im Fokus, es werden vielmehr aus diesen Kenngrößen abgeleitete, vereinfachende Annahmen für Reichweite und Ladezeiten getroffen und in der Lösungsfindung genutzt. In der

Diskussion sind Fahrzeuge berücksichtigt, die einen rein elektrischen Antrieb haben und elektrochemische Energiespeicher verwenden (Battery Electric Vehicle, BEV). Kosten aufgrund von Batteriedegenerationen bezogen auf unterschiedliche Ladearten sind nicht berücksichtigt. Hybridfahrzeuge und Brennstoffzellenantriebe werden nicht diskutiert.

Es wird nicht problematisiert, dass für die Gesamtbetrachtung der Begrenzung des CO₂-Ausstoßes der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung ausschlaggebend ist.

1.6 Struktur der Thesis

Diese Arbeit besteht aus sechs aufeinander aufbauenden Kapiteln, die Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der Inhalte.

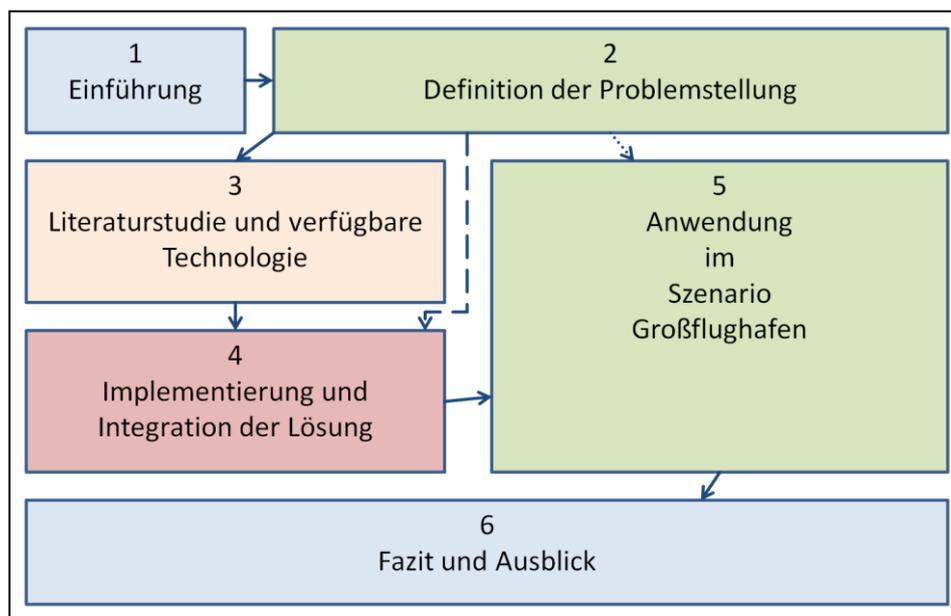


Abbildung 1: Struktur der Thesis

Im Anschluss an dieses einleitende Kapitel folgt die **Definition der Problemstellung**, hier werden alle Objekte und Begriffe des Problemkontextes, die Kernfragestellung und die Struktur des gesuchten Ergebnisses vorgestellt.

Das dritte Kapitel, **Literaturstudie und verfügbare Technologie**, beleuchtet methodische Ansätze zur Lösungsfindung wie lineare Optimierungsmodelle aus dem Gebiet des Operations Research und untersucht den Stand der Technik zur Standortanalyse und Standortoptimierung in Geoinformationssystemen.

Der Aufbau und die Implementierung der prototypischen Anwendung und des generischen Lösungsverfahrens ist Gegenstand des vierten Kapitels, **Implementierung und Integration der Lösung**.

In Kapitel fünf, **Anwendung im Szenario Großflughafen**, erfolgt die Erprobung des Lösungsverfahrens an einem realitätsnahen Szenario, das auf einer konkreten Geschäftssituation basiert.

Das abschließende Kapitel, **Fazit und Ausblick**, nimmt eine Bewertung der erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse vor und schließt mit einem Ausblick auf weiterführende Arbeiten zur Optimierung der Lösung und des erarbeiteten Verfahrens.

Es ist möglich, nach Lektüre des Kapitels 2 sofort zur Beschreibung der Anwendung im Großflughafen-Szenario überzugehen, falls der technische Teil der Lösung weniger interessiert (Lesereihenfolge 2->5). Steht die technische Architektur im Fokus, kann Kapitel 4 eingeschoben werden (Lesereihenfolge 2->4->5). Das Kapitel 5 ist dem Leser jedoch unbedingt zu empfehlen, da die Nutzung und das Zusammenspiel aller Lösungsbestandteile hier im Detail an konkreten Beispielen vermittelt werden.

2 Definition der Problemstellung

Dieses Kapitel beschreibt die behandelte Problemstellung grundlegend, führt die wesentlichen Begriffe und Objekte des Problemkontextes ein und erläutert die Struktur der gesuchten Lösung.

2.1 Kontext und grundlegende Fragestellung

2.1.1 Fahrzeuge im Flottenbetrieb

Eine Fahrzeugflotte ist zu verstehen als die "Gesamtheit aller Fahrzeuge (i.d.R. Lkw, Schiffe oder Flugzeuge) einer organisatorischen Einheit (z.B. Unternehmung, Land) und/oder bestimmter Bauart und/oder für eine bestimmte Einsatzart (z.B. Handels-, Fischerei-, Kriegs-, Tanker-, Luftfracht-Flotte, Fahrzeugflotte)" [GABLER 2012].

Die Problemstellung dieser Arbeit bezieht sich auf Flotten gleichartiger Fahrzeuge, deren Einsatzart die Lieferung oder Aufnahme von Gütern oder aber die Erbringung oder Entgegennahme von Dienstleistungen an bestimmten Orten ist. Die grundlegende Bedarfs- und Versorgungsstruktur ist dabei bekannt und beschreibbar und oftmals bereits in Form einer Tourenplanung abgebildet und etabliert.

Die Fahrzeuge der hier betrachteten Flotten sind jeweils gleichartig bezüglich der Art und Menge der transportierten Güter oder Dienstleistungen sowie bezüglich der Einsatzreichweite und des Zeitbedarfs zur Betankung. Die einzelnen Fahrzeuge einer Flotte sind somit im Sinne der Zweckerfüllung gleichwertig und untereinander austauschbar.

Beispiele für Fahrzeugflotten im Sinne dieser Arbeit sind Flotten bei Car-Sharing-Unternehmen, im öffentlichen Nahverkehr und im Passagiertransport an Flughäfen.

2.1.2 Elektrofahrzeuge als Chance und Herausforderung

Die Umstellung von Fahrzeugflotten auf Elektrofahrzeuge bietet in Kombination mit der Nutzung regenerativer Energiequellen die Chance, den lokalen Ausstoß von klimaschädlichen Emissionen (z.B. CO₂) zu reduzieren oder zumindest zu begrenzen.

Eine technologische Hürde für die Umstellung auf batteriegetriebene Fahrzeuge stellen die vergleichsweise geringen Reichweiten dar. Die tatsächlich erzielbaren Reichweiten von Personenkraftwagen mit rein elektrischem Antrieb liegen bei ca. 100 km [ADAC 2012]. In von Kurzstrecken geprägten Szenarien dürfte die limitierte Reichweite für den Flottenbetrieb allerdings kein signifikantes Problem darstellen.

Hinzu kommt jedoch als zweite große Herausforderung der um etwa zwei Größenordnungen höhere Zeitbedarf für das Aufladen von Batterien im Vergleich zum Nachtanken eines Benzin- oder Dieselfahrzeugs. Im PKW-Bereich liegen die tatsächlich erforderlichen Ladezeiten heute bei ca. 8 h [ADAC 2012]. Zu bedenken ist angesichts des hohen Zeitbedarfs insbesondere auch, dass eine einzelne Ladestation während eines Ladevorgangs für weitere Fahrzeuge nicht nutzbar ist.

Die Ladeinfrastrukturen im privaten, öffentlichen und gewerblichen Bereich sind zudem erst im Aufbau begriffen. Die Kosten zur Errichtung einer Ladestation sind beträchtlich, zumal häufig neben den Kosten für die Ladesäulen selbst auch Erschließungs- bzw. Anschlusskosten für die Netzanbindung hinzukommen. Eine einzelne Ladestation kostet ohne Installation beispielsweise ca. 5000 € [EMOSOLAR 2011], für die gesamte Einrichtung einer Solartankstelle für fünf Fahrzeuge in einem Parkhaus in Bad Lippspringe war eine Investition von etwa 350.000 € erforderlich [ENERGIEPORTAL24 2012]. Ladestationen sind somit als knappes Gut zu begreifen, was eine sorgfältige Auswahl der Standorte unabdingbar macht.

Vor dem Hintergrund dieser Rahmenbedingungen steht nun eine besondere Akzeptanzproblematik, die grundlegender Antrieb für diese Arbeit ist:

Die Umstellung auf Elektroantrieb soll für die Flotte möglichst wenige Änderungen an bestehenden Planungen und etablierten Abläufen auslösen. Umwege zu Ladestationen und Wartezeiten für Ladevorgänge sind somit praktisch nicht tolerabel.

Ein Ansatz, dieses Ziel zu erreichen, ist die konsequente Ausnutzung von Standzeiten der Fahrzeuge für Zwischenladevorgänge *während* der Auftragsverrichtung.

Technische Fortschritte und die Suche nach Alternativen in der Batterie- und Ladetechnik werden die Randbedingungen Reichweite und Ladezeitbedarf in den nächsten Jahren vermutlich signifikant verschieben. Für Flotten, in denen Kurzstreckenfahrten mit häufigen Haltevorgängen typisch sind, kommen Ultrakondensatoren als elektrische Energiespeicher in Betracht, die bereits im öffentlichen Busverkehr erprobt werden. Hier liegen die Ladezeiten im Minutenbereich während die maximale Reichweite bei etwa 10 km liegt [YE 2010]. Für den Langstreckenbereich existieren Konzepte zum Batterietausch, die ebenfalls ‚Ladezeiten‘ im Minutenbereich erlauben [BETTER PLACE 2012]. Die Normierung der Formate und die vermutlich erforderliche Bevorratung einer hohen Anzahl – auch unterschiedlicher Typen – von Batterien an den ‚Tankstellen‘ dürfte allerdings eine große Herausforderung sein und ebenfalls die Wichtigkeit einer sorgfältigen Planung der Infrastruktur unterstreichen.

2.1.3 Kernfrage dieser Arbeit

Aus den vorangehenden Betrachtungen bezüglich des Flottenbetriebs und der technologischen Rahmenbedingungen für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb ergibt sich die folgende Kernfragestellung bei der Umstellung einer Flotte auf Elektrofahrzeuge:

An welchen Orten ist welche Anzahl von Ladestationen mindestens erforderlich, um die Versorgung der gegebenen Bedarfsstruktur möglichst kostengünstig aufrecht erhalten zu können?

Die konkrete Suche nach Lösungen für diese Fragestellung wird geprägt sein durch experimentelle Variationen der Parameter Reichweite und Ladezeit sowie der Kosten zur Errichtung von Ladestationen.

Die folgenden Abschnitte erläutern die wesentlichen Elemente, die als Voraussetzung für eine Formalisierung der Kernfragestellung dienen und zur Strukturierung der Lösung benötigt werden.

2.2 Relevante Objekte und Begriffe

2.2.1 Übersicht

Die relevanten Objekte der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Problemstellung sind die Fahrzeuge einer Flotte, eine Netztopologie aus potentiellen Fahrtstrecken, Bedarfspunkte sowie Aufträge, die es an den Bedarfspunkten zu erfüllen gilt.

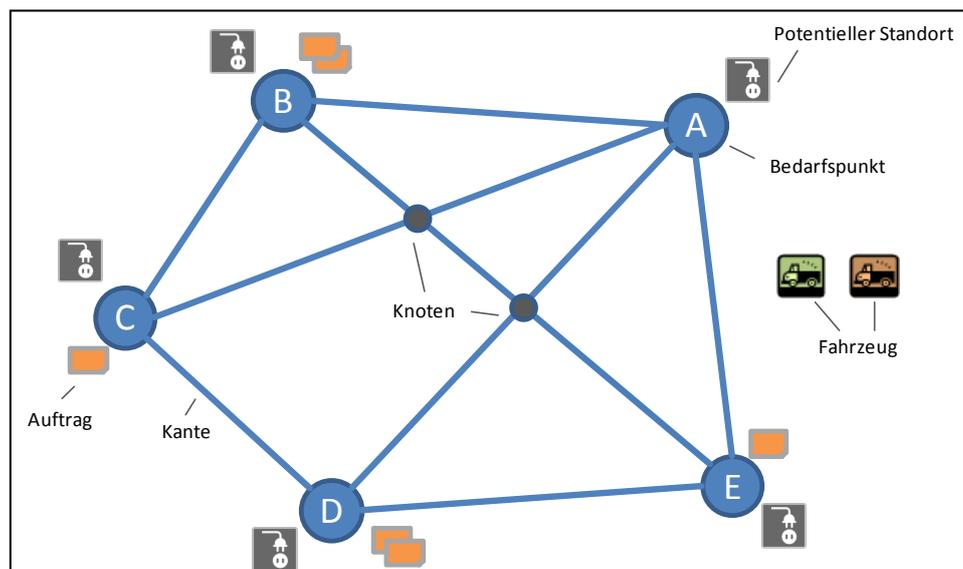


Abbildung 2: Objekte im Problemkontext

Die Abbildung 2 zeigt dazu eine Übersicht, die anschließenden Abschnitte dienen der detaillierteren Beschreibung der gezeigten Elemente.

2.2.2 Bedarfspunkte

Bedarf ist zu verstehen als „1. Ergebnis objektivierbarer Bedürfnisse, die messbar und in Zahlen ausdrückbar sind. 2. Ökonomischer Begriff für eine am Markt tatsächlich auftretende Nachfrage. 3. Objektorientierte Handlungsabsicht, die einem bestimmten Bedürfnis folgt“ [GABLER 2012].

Bedarfspunkte im Sinne dieser Arbeit sind Orte, die von *Fahrzeugen* zum Zwecke der Bedarfsdeckung besucht werden. Die *Fahrzeuge* liefern Güter ab oder nehmen diese auf oder es wird eine Dienstleistung verrichtet bzw. in Anspruch genommen.

Bedarfspunkte befinden sich an bestimmten *Knoten* eines *Wegenetzes*, über das sie von den *Fahrzeugen* erreicht werden können.

Beispiele für Bedarfspunkte sind Filialen von Handelsketten, Adressaten von Paketsendungen oder Parkpositionen von Flugzeugen. Bedarfspunkte können auch räumliche Verdichtungen sein, beispielsweise kann ein Stadtgebiet, dessen Einwohner von einem Paketdienst versorgt werden, vereinfachend zu einem einzelnen Bedarfspunkt zusammengefasst werden.

Depots bzw. Lager sind besondere Bedarfspunkte, an denen *Touren* beginnen und enden. Depots sind in Abbildung 2 nicht gesondert gekennzeichnet, im nachfolgenden Beispiel wird Bedarfspunkt A als Depot genutzt.

2.2.3 Wegenetz

Das *Wegenetz* beinhaltet alle Wegstrecken, die die Fahrzeuge benutzen können. Es besteht aus *Knoten* und gerichteten *Kanten*, die die Knoten miteinander verbinden. Als Knoten sind alle Kreuzungen und Abzweigungs- sowie Endpunkte aufzufassen. Bedarfspunkte sind besondere Knoten, jeder Bedarfspunkt befindet sich an genau einem Knoten des Wegenetzes.

Die Kanten eines Wegenetzes haben verschiedene Eigenschaften, die als Gewichtung bei der Berechnung von *Touren* in der Netztopologie genutzt werden können, zum Beispiel:

- Streckenlänge (wegegebundene Entfernung zwischen den Knoten der Kante),
- Fahrtzeit (Zeit, die zur vollständigen Befahrung einer Kante nötig ist).

Des Weiteren enthält ein Wegenetz eine Reihe von Restriktionen, dazu gehören unter anderem:

- Verbote für bestimmte Fahrzeugtypen,
- Einschränkungen für Fahrtrichtungen (Einbahnstraßen),
- Maximal zulässige Geschwindigkeiten, Gesamtgewichte oder Fahrzeughöhen,
- Abbiegevorschriften und -verbote.

Beispiele für Wegenetze sind ein Straßennetz mit Autobahnen, Bundesstraßen und Landstraßen oder ein Streckennetz für Betriebsfahrzeuge auf einem Großflughafen.

2.2.4 Fahrzeuge

Die *Fahrzeuge* bewegen sich im *Wegenetz* zur Erfüllung von *Aufträgen* an *Bedarfspunkten*. Sie sind nach Einsatzgebiet klassifiziert, jedes Fahrzeug eignet sich für den Transport bestimmter Güter oder zur Erbringung bestimmter Dienstleistungen. Als Elektrofahrzeuge haben sie eine maximale Reichweite, die abhängig von der elektrischen Kapazität der Batterie ist. Die Fahrzeuge können als Bedarfspunkte in Bewegung angesehen werden, sie haben einen Bedarf an elektrischer Energie, die für das Zurücklegen von Fahrtstrecken erforderlich ist.

Weitere Attribute können z.B. die maximale gesamte Einsatzdauer oder die maximal zu fahrende Gesamtstrecke in einer festzulegenden *Periode* sein.

Beispiele für Fahrzeuge sind Omnibusse zum Personentransport oder Tankfahrzeuge zum Transport von Treibstoff und zur Durchführung von Betankungsvorgängen.

2.2.5 Aufträge

Aufträge definieren konkreten Bedarf an *Bedarfspunkten*, sie enthalten also Informationen zu Art und Menge von nachgefragten Gütern oder Dienstleistungen.

Jedem Auftrag kann die für die Auftragserfüllung erforderliche Zeit zugeordnet werden. Die Zeit zur Auftragserfüllung stellt für Elektrofahrzeuge eine potentielle Ladezeit am Ort der Auftragserfüllung dar. Zusätzlich können zulässige Zeitfenster für die Ausführung des Auftrags oder weitere Randbedingungen enthalten sein.

Der Auftrag selbst enthält noch keine Zuordnung zu einem konkreten Fahrzeug, diese Zuordnung wird erst bei der Planung von *Touren* getroffen.

Ein Auftrag kann zum Beispiel das Verbringen von 100 Passagieren mit einem Bus zu einem Flugzeugstandort im Vorfeld eines Flughafens sein.

2.2.6 Touren und Etappen

Touren beschreiben Sequenzen von abzuarbeitenden *Aufträgen* für *Fahrzeuge*.

Jede Tour enthält ausgehend vom *Depot* die von einem einzelnen Fahrzeug befahrenen Strecken des *Wegenetzes* über alle angefahrenen Bedarfspunkte bis zum Depot zurück. Die befahrenen Strecken und deren Reihenfolge werden für jede Tour so gewählt, dass die zur Tour gehörenden Bedarfspunkte mit minimaler Fahrtzeit oder minimaler Fahrtstrecke besucht werden.

Die Fahrtstrecke zwischen zwei Bedarfspunkten einer Tour wird als *Etappe* bezeichnet.

Die Menge aller Touren ist das Ergebnis eines Planungsvorgangs, der die Gesamtheit der Aufträge so auf die verfügbaren Fahrzeuge verteilt, dass die Gesamtfahrtzeit oder die Gesamtstrecke minimiert werden. Es können auch weitere Gewichtungen in die Planung einfließen, etwa Kosten pro Zeiteinheit oder je gefahrenem Kilometer.

Es ist nicht auszuschließen, dass bei der Umstellung einer Flotte auf Elektrofahrzeuge Änderungen an etablierten Touren erforderlich werden, etwa weil sich geänderte Ladekapazitäten bezüglich zu transportierender Güter ergeben. Wie bereits angesprochen sind Änderungen an Touren in Form von Umwegen zu Ladestationen jedoch eher zu vermeiden.

Beispiele für Touren sind die Tagesfahrten von Paketkurieren oder die Folge der Besuche eines Reinigungsdienstes an den Flugzeugstandorten verschiedener Airlines an einem Flughafen.

2.2.7 Perioden

Eine *Periode* im Sinne der Problemstellung ist die gesamte Zeitspanne, in der die betrachteten *Touren* stattfinden, also z.B. ein Arbeitstag, eine Schicht oder eine Stunde.

Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass jedes Fahrzeug in einer Periode genau eine oder aber keine Tour fährt.

2.2.8 Potentielle Standorte für Ladestationen

Potentielle Standorte sind im Rahmen der betrachteten Zielsetzung mögliche Standorte zur Errichtung von Ladeinfrastruktur in unmittelbarer Nähe der *Bedarfspunkte*. Unmittelbar bedeutet dabei, dass Ladevorgänge während der Verrichtung von Aufträgen ohne zusätzliche Fahrtstrecken stattfinden können.

Die potentiellen Standorte sind mit Informationen zu den Kosten zur Errichtung sowie zur maximal möglichen Anzahl von *Ladestationen* zu versehen. Die Kosten zur Errichtung ergeben sich entweder aus den Geräte-, Anschluss- und Aufbaukosten oder aus den Fixkosten für eine Anmietung oder Freischaltung bestehender Einrichtungen. Eine *Ladestation* im Sinne der Problemstellung ist geeignet, um zu einer Zeit genau ein Elektrofahrzeug zu laden. Wesentliche Eigenschaft einer Ladestation ist die maximale elektrische Ladeleistung, die ausschlaggebend für die Ladezeiten der Fahrzeuge ist.

Beispiele für potentielle Standorte sind Haltestellen für Elektrobusse im öffentlichen Nahverkehr oder Anlieferbereiche von Warenhäusern.

2.3 Struktur und Ergebnis der Lösungssuche

Nachdem die wesentlichen Elemente des Kontextes der Problemstellung eingeführt sind, beschreibt dieser Abschnitt nun das angestrebte Ergebnis der Lösungssuche, die Freiheitsgrade, Parameter, Randbedingungen sowie das verfolgte Optimierungsziel.

2.3.1 Ergebnis

Die Lösungssuche besteht aus zwei Teilschritten, nämlich der Durchführung der Tourenplanung zu den Aufträgen und der Bestimmung der nötigen Ladestationen an den Bedarfspunkten.

Das Endergebnis der Lösungssuche ist im Kern eine Liste der benötigten Ladestationen an den Bedarfspunkten. Die Visualisierung der Lösung erfolgt als kartografische Darstellung.

Insbesondere zu Zwecken der detaillierten Erläuterung und Plausibilisierung sind folgende Elemente ebenfalls als Ergebnisbestandteil zu verstehen:

- Sequenz der Etappen in den Touren je Fahrzeug,
- Restreichweiten je Fahrzeug in den besuchten Bedarfspunkten,
- Ladezeiten je Fahrzeug und Bedarfspunkt,
- Gesamtladezeit je Fahrzeug,
- Gesamtladezeiten je Bedarfspunkt,
- Zurückgelegte Entfernung je Fahrzeug.

2.3.2 Parameter

Parameter für die Lösungssuche sind zunächst Eigenschaften der Orte und Objekte:

- Kosten der Errichtung von Ladestationen je Bedarfspunkt,
- Anzahl der Ladestationen, die je Bedarfspunkt maximal errichtet werden können,
- Entfernungsmatrix des Wegenetzes,
- Besuchszeiten an den Bedarfspunkten je Fahrzeug zur Auftragserfüllung,

- Maximale Reichweite der Fahrzeuge bei voller Aufladung der Batterie.

Als weiterer Parameter wird aus Gründen der Vereinfachung die

- Laderate als Reichweitengewinn pro Zeiteinheit

eingeführt. Die Laderate ist der Quotient¹ aus der maximalen Reichweite der Fahrzeuge und dem Zeitbedarf für eine Vollladung, wobei von einer linearen Ladekurve ausgegangen wird.

2.3.3 Variablen

Die Variablen spannen den Lösungsraum auf, sie repräsentieren den Entscheidungsfrei-
raum bzw. die Freiheitsgrade in der durch die vorgenannten Parameter gesetzten Situa-
tion:

- Anzahl der zu errichtenden Ladestationen je Bedarfspunkt,
- Restreichweiten bei Ankünften an den Bedarfspunkten,
- Durchzuführende Ladevorgänge je Fahrzeug und Bedarfspunkt,
- Reichweitenzugewinne durch Ladevorgänge an Bedarfspunkten.

Die Belegung der Variablen wird durch die nachfolgend erläuterten Randbedingungen
bzw. Restriktionen auf sinnvolle Werte beschränkt. So entsteht eine Menge von gültigen
Lösungen, also Sätze mit gültigen Wertbelegungen der Entscheidungsvariablen.

Die Auswahl der optimalen Lösung aus der Menge gültiger Lösungen geschieht unter
Berücksichtigung des auf Seite 24 formulierten Optimierungsziels.

¹ Unter der Annahme, dass die Batteriecharakteristik für alle Fahrzeuge einer Flotte identisch und durch ein lineares Modell beschreibbar ist (z.B. 16 kWh, 230 V, 80 km Reichweite) und alle Bedarfspunkte über gleichartige Ladestationen für diese Flotte verfügen (z.B. 16 A, 230 V) ergibt sich eine Ladezeit von ca. 4 h, was einer Laderate von 20 km/h oder 0,3 km/min entspricht.

2.3.4 Randbedingungen

Bei der Suche nach der optimalen Lösung gelten einige Restriktionen, die ungültige Ergebnisse ausschließen:

1. Die Restreichweite eines jeden Fahrzeugs in jedem anzufahrenden Bedarfspunkt muss positiv sein, das heißt kein Fahrzeug darf mit leerer Batterie liegen bleiben.
2. Die Restreichweite eines Fahrzeugs an einem Bedarfspunkt ergibt sich aus der Restreichweite am vorangegangenen Bedarfspunkt zuzüglich des dort möglicherweise durch einen Ladevorgang erzielten Reichweitengewinns abzüglich der von dort aus gefahrenen Wegstrecke.
3. Der Reichweitengewinn durch einen Ladevorgang eines Fahrzeugs an einem Bedarfspunkt ist durch die Laderate und Verweilzeit am Bedarfspunkt bestimmt.
4. Der Reichweitengewinn durch einen Ladevorgang eines Fahrzeugs an einem Bedarfspunkt ist durch die sich aus der Batteriekapazität ergebende maximale Reichweite nach oben begrenzt.
5. Für jedes Fahrzeug, das auf einer Tour an einem Bedarfspunkt laden muss, ist eine Ladestation erforderlich, damit keine zusätzliche Wartezeit für andere Fahrzeuge mit Ladebedarf entsteht.
6. Die Anzahl der maximal an einem Bedarfspunkt einrichtbaren Ladestationen ist beschränkt, da die maximale Anschlussleistung am Bedarfspunkt stets begrenzt ist.

2.3.5 Optimierungsziel

Das Optimierungsziel für die Lösungssuche kann durch eine Funktion von Parametern und Entscheidungsvariablen formuliert werden, zu der entweder das Maximum oder das Minimum gesucht ist.

Im Kontext der hier beschriebenen Problemstellung ist das Optimierungsziel:

Minimierung der Gesamtkosten als Summe der Produkte aus Anzahl zu errichtender Ladestationen und dem Preis je Ladestation über alle Bedarfspunkte.

2.3.6 Laufzeitanforderungen

Die Ermittlung optimaler Standorte für Ladestationen ist ein planerischer Vorgang, der typischerweise nicht im operativen Betrieb stattfindet und somit keine Echtzeitanwendung mit garantierter Antwortzeit, z.B. im Sekundenbereich, darstellt. Ein Zeitbedarf der Lösungssuche von mehreren Stunden bis hin zu ein bis zwei Tagen wird daher im Rahmen dieser Arbeit als tolerabel angenommen.

2.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel hat die grundlegende Fragestellung und die Objekte des Problemkontextes eingeführt. Darüber hinaus sind die Grundzüge der Lösungssuche mit Randbedingungen und Optimierungsziel definiert.

Die folgende Abbildung 3 skizziert beispielhaft Inhalt und Darstellung des Ergebnisses einer Lösungssuche.

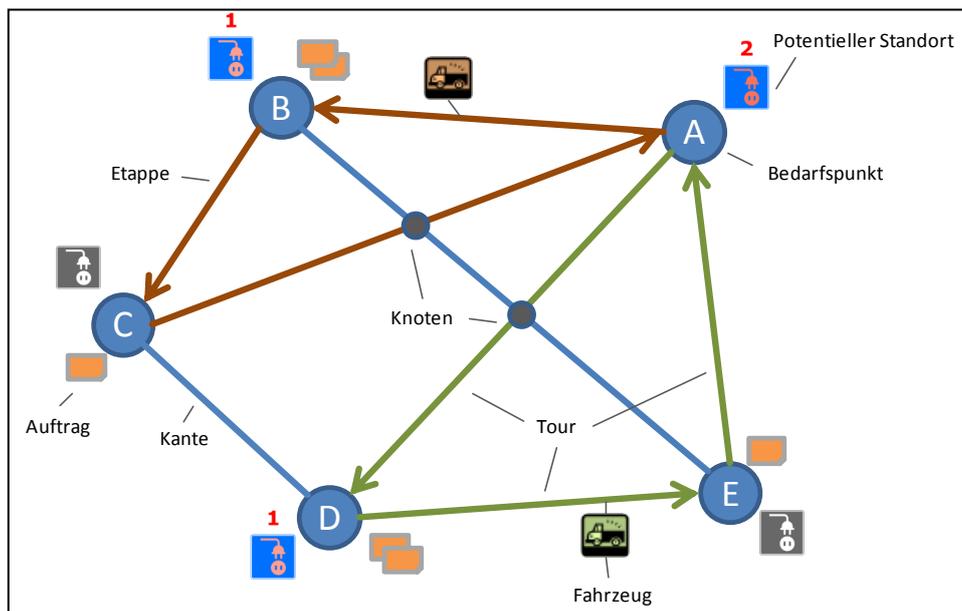


Abbildung 3: Schematische Ergebnisdarstellung

Das Ergebnis des ersten Schrittes der Lösungssuche ist in Form der beiden farblich markierten Touren (A-B-C-A und A-D-E-A) mit Zuordnung der Fahrzeuge dargestellt. In diesem Schritt ist der Bedarf durch einen Auftrag beschrieben und stationär einem Bedarfspunkt zugeordnet.

Bei der Standortoptimierung für die Ladestationen im zweiten Schritt entsteht der zu betrachtende (Energie-) Bedarf am sich bewegenden Fahrzeug, das in der Bewegung elektrische Energie verbraucht. Dieser zweite Schritt der Lösungssuche hat im gezeigten Beispiel ermittelt, dass am Bedarfspunkt A zwei Ladestationen benötigt werden, während an den Punkten B und D jeweils eine Einrichtung erforderlich ist. An den Bedarfspunkten C und E kann auf Ladeinfrastruktur verzichtet werden.

Das folgende Kapitel nimmt eine Literaturstudie in den für die Umsetzung der Lösungsfindung relevanten Methodenfeldern vor. Es untersucht Modelle und Lösungsverfahren für bekannte ähnliche Problemstellungen hinsichtlich der Anwendbarkeit und stellt schließlich heraus, welche verfügbaren Komponenten eines marktgängigen Geoinformationssystems in welcher Form zur Lösungsfindung genutzt werden können.

3 Literaturstudie und verfügbare Technologie

3.1 Überblick

Der Weg zur Lösungsfindung für die im vorangehenden Kapitel dargestellte Problemstellung und zur Umsetzung in Form einer prototypisch implementierten Arbeitsumgebung beginnt in zwei Pfaden.

Zunächst ist eine methodisch orientierte Studie erforderlich, um für das vorliegende zweistufige Optimierungsproblem passende Methoden und Lösungsansätze in der Literatur zu finden. Dann ist eine technisch-produktorientierte Studie nötig, die die heute in Produkten bereits verfügbare Technologie zusammenstellt und aufzeigt, welche Komponenten in welcher Form zur Gesamtlösung beitragen können.

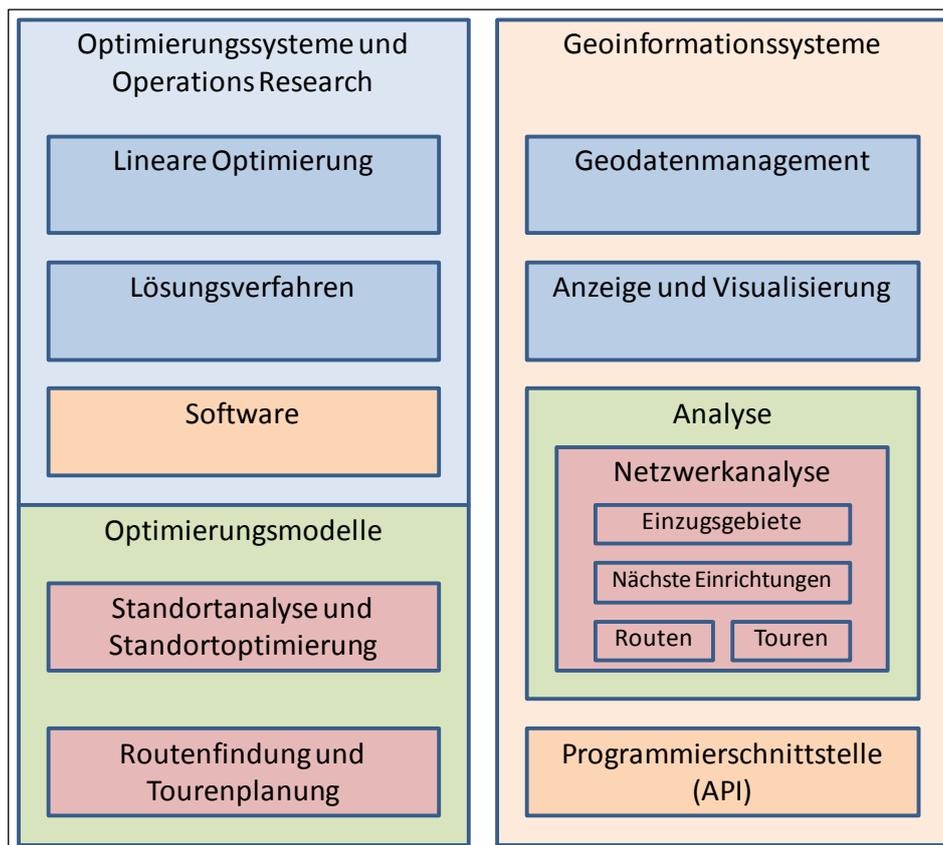


Abbildung 4: Übersicht Literaturstudie und verfügbare Technologie

Wie in Abbildung 4 dargestellt, geht es in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels somit um das Methodenfeld *Operations Research (OR)* und die Technologie der *Geoinformationssysteme (GIS)*.

Im Gebiet des OR finden sich etablierte Methoden wie die Lineare Optimierung bzw. Lineare Programmierung, die zur Formalisierung und Modellierung von Optimierungsproblemen eingesetzt werden. Es existiert eine Reihe von Optimierungssystemen in Form von Softwareprodukten, die die Entwicklung von Modellen effizient unterstützen und verschiedene Lösungsverfahren implementieren. In der Literatur finden sich zahlreiche Modelle aus den Gebieten Standortanalyse und Routenfindung, die sich nach Optimierungszielen und Restriktionen klassifizieren lassen und mit unterschiedlichen Lösungsverfahren zu lösen sind.

Die Geoinformationssysteme (GIS) dienen der Verwaltung, Transformation und Visualisierung von raumbezogenen Daten. Darüber hinaus beinhalten einige GIS analytische Funktionen aus dem Gebiet der Netzwerkanalyse und verfügen über Programmierschnittstellen, die eine Kommunikation mit anderen Produkten sowie Erweiterungen des Funktionsumfangs zulassen.

3.2 Optimierungssysteme und Operations Research

"Unter dem Begriff Operations Research (OR) verstehen wir allgemein die Entwicklung und den Einsatz quantitativer Modelle und Methoden zur Entscheidungsunterstützung in Unternehmen und Organisationen" [SUHL ET AL. 2009, S. 5].

Die Entscheidungsprobleme aus der Realität werden als Modelle mit Zielfunktionen, Freiheitsgraden (Entscheidungsvariablen) und Nebenbedingungen (Restriktionen) abgebildet und abstrahiert (vgl. [SUHL ET AL. 2009, S. 6 f.]).

3.2.1 Lineare Optimierung

"Wenn die Zielfunktion und alle Restriktionen eines Optimierungsmodells Linearkombinationen der Entscheidungsvariablen sind, können Modellierungs- und Lösungstechnologien der linearen Optimierung (Linear Programming, LP) eingesetzt werden. Dabei wird eine gegebene Zielfunktion minimiert oder maximiert, unter Berücksichtigung von linearen Restriktionen, die Gleichungen oder Ungleichungen [...] sein können" [SUHL ET AL. 2009, S. 8].

Sind einige der Variablen in einem linearen Optimierungsproblem ganzzahlig und somit diskret, so spricht man von einer gemischt-ganzzahligen Optimierung (Mixed Integer Programming, MIP). Wenn alle Variablen diskret sind, handelt es sich um ein ganzzahliges Optimierungsproblem (Integer Programming, IP). MIP- und IP-Modelle sind im Vergleich zu kontinuierlichen linearen Modellen sehr schwer zu lösen, es sind spezielle Lösungsstrategien erforderlich.

LP-, MIP und IP-Modelle sind aufgrund ihrer universellen Verwendbarkeit in verschiedenen Klassen von Entscheidungsproblemen und wegen der Verfügbarkeit ausgereifter Lösungsverfahren und -algorithmen bedeutsam.

3.2.2 Lösungsverfahren

Eines der bekanntesten Lösungsverfahren für LP-Modelle ist die *Simplex-Methode*, die im ersten Schritt eine zulässige Lösung sucht und dann von dieser ausgehend iterativ verbesserte Lösungen ermittelt. Die Methode konvergiert gegen die optimale Lösung (vgl. [SUHL ET AL. 2009, S. 45]).

Während es für kontinuierliche LP-Modelle deterministische Lösungsverfahren gibt, deren Rechenaufwand abhängig von der Problemgröße polynomiell wächst (Problemklasse P), ist das allgemein formulierte MIP-Problem der Problemklasse NP (nicht deterministisch polynomiell) zugeordnet. Für das MIP-Problem ist heute kein deterministisches Lösungsverfahren mit polynomiell wachsendem Aufwand bekannt (vgl. [SUHL ET AL. 2009, S. 136f.]). Das Anwachsen der Laufzeiten zur Problemlösung auf deterministisch arbeitenden Rechnern kann hier bei steigender Problemgröße exponentiell sein. Zur exakten Lösung von MIP-Problemen existieren besondere Methoden, die Teile des möglichen Lösungsraums aufgrund logischer Bedingungen von der Suche ausschließen. Zu diesen Methoden gehören *Backtracking* und *Branch&Bound*.

"Das Backtracking-Verfahren bezeichnet eine [...] Methode: Entscheidungen, die während des Ablaufs des Verfahrens getroffen wurden, können revidiert werden, indem man zur Stelle, bei der die Entscheidung getroffen wurde, zurückkehrt (Backtracking), eine der alternativ dazu möglichen Entscheidungen trifft und das Verfahren weiterführt" [SUHL ET AL. 2009, S. 142].

Bei der Branch&Bound Methode wird die Erzeugung der Entscheidungsteilbäume unter Ausnutzung vorhandener Informationen vorgenommen (branching), dabei werden die Knoten der Teilbäume passend zur Zielfunktion vorsortiert. Die Vereinigung der Lösungsmengen der Teilbäume ergibt die Gesamtlösung. Für die einzelnen Teilbäume werden obere bzw. untere Schranken ermittelt, deren Über- bzw. Unterschreitung eine optimale Lösung unmöglich machen (bounding), wodurch viele Bereiche des gesamten Suchbaums von der Lösungsfindung ausgeschlossen werden können (vgl. [SUHL ET AL. 2009, S. 151 f.] und [WIRTH 1983, S. 174 f.]).

Oftmals greift man auch auf *Heuristiken* zurück. Dies sind approximative Verfahren, die in verhältnismäßig geringer Rechenzeit eine ‚gute‘ statt der optimalen Lösung ermitteln. Neben den auf einzelne Problemtypen spezialisierten Heuristiken sind *Metaheuristiken* etabliert, die gute Lösungen für ganze Problemklassen ermitteln können (vgl. [SUHL ET AL. 2009, S. 137, 140-142 f.]). Zu den Metaheuristiken gehört das Verfahren *Tabu Search*.

Tabu Search ist analog zur Simplex-Methode ein iteratives Verfahren, das von einer initialen Lösung des Problems ausgehend versucht, verbesserte Lösungen in der Nachbarschaft der bisher besten Lösung zu finden. Beim Tabu Search wird der bisherige Verlauf der Suche in Tabulisten gespeichert, die in nachfolgenden Schritten zur Einschränkung der Nachbarschaft einer Lösung genutzt werden. So werden Zyklen in der Lösungssuche und das Verharren an lokalen Optima verhindert. Tabu Search kann flexibel auf verschiedene Problemmodellierungen angewendet werden, indem insbesondere die Bewertungsfunktion für die Qualität der erreichten Lösungen und die Nachbarschaftsbeziehungen für die Ermittlung der ‚nächsten‘ zu suchenden Lösung angepasst werden. Für einen weitergehenden Überblick zu Tabu Search sei auf [HEPPNER 2006] und die dort angegebenen Quellen verwiesen.

Die Diskussion der Lösungsverfahren für LP- und MIP-Modelle soll an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden. In der Praxis wird für die Lösung von MIP-Modellen in der Regel auf fertige Software zurückgegriffen, die die hier aufgeführten und weitere Verfahren implementiert. Die Neuimplementierung eines Solvers auf Basis bestehender Lösungsverfahren oder gar die Entwicklung eines neuen Lösungsverfahrens für lineare Optimierungsprobleme sind nicht Gegenstand dieser Arbeit, die im Rahmen der angestrebten prototypischen Implementierung ebenfalls auf eine marktgängige Optimierungssoftware zurückgreift. Der folgende Abschnitt erläutert die Auswahl einer geeigneten Software.

3.2.3 Software

Es gibt einige Standard-Softwarelösungen am Markt, die im Kern einen oder mehrere sogenannte Solver für LP- und MIP-Modelle haben und über Schnittstellen für die Ein- und Ausgabe von Daten sowie vollständige Entwicklungsumgebungen für die Erstellung von Optimierungsprogrammen verfügen.

Als Marktführer in diesem Bereich gilt das *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio* [IBM 2012]. Weitere Vertreter sind *XPressMP* [FICO 2012] und *AIMMS* [PARAGON 2012]. Im Gegensatz zu diesen kommerziellen Produkten ist der Solver *lp_solve* auf [SOURCEFORGE 2008] frei verfügbar, enthält jedoch keine vollumfängliche Entwicklungsumgebung.

In dieser Arbeit kommt das *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio* zum Einsatz, da die Verfügbarkeit im Projektkontext gegeben ist und es sowohl eine vollständige Entwicklungsumgebung mit einem Debugger als auch eine API zur Einbindung in eigene .net-Applikationen enthält. Zudem gilt der CPLEX-Solver als sehr ausgereift und leistungsstark (vgl. [SUHL ET AL. 2009, S. 79 f.]). Die Erstellung von Optimierungsmodellen erfolgt in der integrierten Optimierungssprache *OPL* (Optimization Programming Language).

3.2.4 Relevanz für die Aufgabenstellung

Die vorangehenden Abschnitte legen nahe, dass die mathematische Modellierung der Problemstellung dieser Arbeit mit den Methoden der Linearen Optimierung aus dem Gebiet des Operation Research möglich und sinnvoll ist. Die Problemstellung kann so formalisiert und mit verfügbaren Solvern für LP- bzw. MIP-Modelle gelöst werden, ohne dass eine individuelle Lösung zu programmieren ist.

Die Umsetzung auf Basis des IBM ILOG CPLEX Optimization Studios verspricht wesentliche Erleichterungen bei der Modellentwicklung und Pflege in OPL und bei der Durchführung von Experimenten mit Modellvarianten. Ebenso können Parametrisierung und Aufruf des Solvers über eine .net-API aus einem GIS-System heraus erfolgen, das nach erfolgter Lösungssuche die Ergebnisse vom Solver übernimmt und visualisiert.

3.3 Standortanalyse und Standortoptimierung

3.3.1 Überblick

Der Themenkomplex Standortanalyse, Standortoptimierung und Standortplanung wird in der Literatur sehr häufig unter dem Begriff *Facility Location* behandelt. Unter der Bezeichnung *Facility Location Problems* sind viele unterschiedliche Problemvarianten bekannt, die zumeist in Form von linearen Optimierungsmodellen formuliert sind.

In allen Varianten geht es um die Versorgung bzw. Bedarfsdeckung durch Einrichtungen, deren Anzahl und/oder Standorte zu bestimmen sind. Die unterschiedlichen Varianten lassen sich in drei Hauptkategorien einteilen (vgl. [KIM 2010, S. 9 f.]).

Die sogenannten *Covering Models* beschreiben Probleme, in denen Bedarfspunkte in einer bestimmten, kritischen Zeitspanne oder Entfernung erreicht werden müssen. Covering Models kommen zum Beispiel bei notfalldienstlichen Szenarien zur Anwendung, etwa wenn es um die Einhaltung von Hilfsfristen geht (siehe hierzu [STEY 2008]).

Die zweite Kategorie der *Median Based Models* kommt für Problemstellungen zum Einsatz, bei denen die bedarfsgewichtete mittlere Entfernung (räumlich oder zeitlich) zwischen jedem Bedarfspunkt und der jeweils zugeordneten versorgenden Einrichtung zu minimieren ist. Die Standortwahl für Geschäfte oder Warenhäuser ist ein Anwendungsfall für diese Modellklasse.

Die *Flow Based Demand Models* decken Szenarien ab, bei denen der Bedarf nicht an stationären Punkten, sondern an sich in einem Wegenetz bewegendem Objekten entsteht. Hier geht es bei der Standortwahl darum, möglichst viel des ‚fließenden‘ Bedarfs abzudecken. Dabei kann es beispielsweise um die Standortwahl für Tankstellen auf der Basis von Verkehrsdichtemessungen gehen.

Die Abbildung 5 zeigt die nachfolgend vertiefend diskutierten Modelle aus der Literatur in der Übersicht. Dabei sind für jedes Modell das Optimierungsziel (O), die Entscheidungsvariablen (V) sowie die Parameter (P) aufgeführt. Die Modelle sind in der Literatur zumeist als MIP-Modelle formuliert.

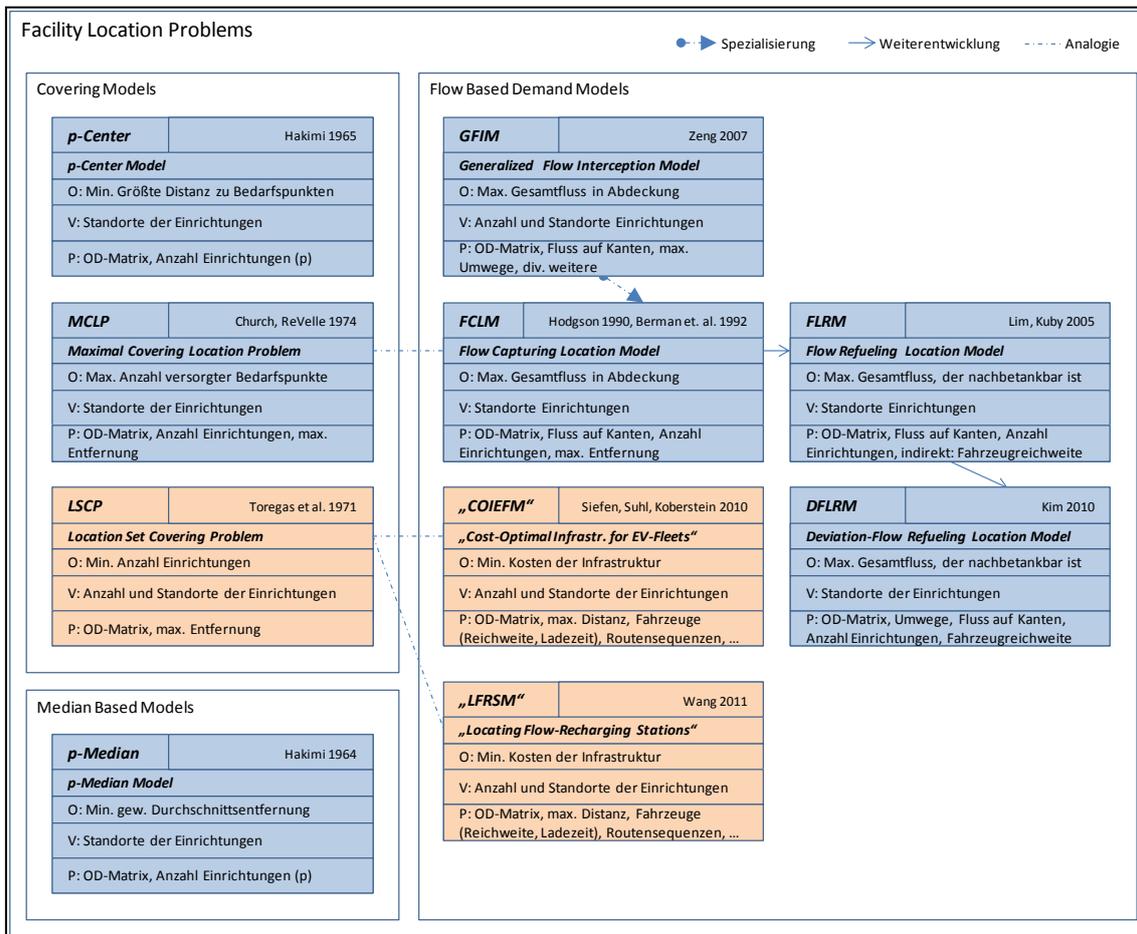


Abbildung 5: Überblick Facility Location Problems

3.3.2 p-Center Model

Das *p-Center Model* (vgl. [HAKIMI 1965]) lokalisiert eine gegebene Anzahl von Einrichtungen so, dass die maximal zurückzulegende Entfernung zwischen einer Einrichtung und einem Bedarfspunkt minimiert wird. Es geht also darum, genau die Verteilung der Standorte zu finden, die alle Bedarfspunkte abdeckt und bei der die größte Entfernung eines Bedarfspunkts zu der ihm zugeordneten Einrichtung minimal ist.

Das Modell ist aufgrund des Optimierungsziels und der Vorgabe einer festen Anzahl von Standorten für die Problemstellung der Arbeit ungeeignet.

3.3.3 Maximal Covering Location Problem (MCLP)

Das *Maximal Covering Location Problem* (vgl. [CHURCH ET AL. 1974]) positioniert eine gegebene Anzahl von Standorten so, dass innerhalb einer gegebenen maximalen Entfernung möglichst viele Bedarfspunkte abgedeckt sind.

Auch dieses Modell ist aufgrund des Optimierungsziels und der Vorgabe einer festen Anzahl von Standorten für die betrachtete Problemstellung ungeeignet.

3.3.4 Location Set Covering Problem (LSCP)

Im Gegensatz zum MCLP ist die Anzahl der Standorte beim *Location Set Covering Problem* (vgl. [TOREGAS ET AL. 1971]) nicht gegeben, denn die Minimierung der Anzahl der Standorte ist hier das Optimierungsziel. Das LSCP bestimmt die minimale Anzahl und die Lage der Standorte so, dass alle Bedarfspunkte in einer vorgegebenen Entfernung erreicht werden.

Dieses Modell kommt der Problemstellung zwar etwas näher, da die Anzahl nötiger Standorte bestimmt und diese geeignet positioniert werden. Allerdings geht es von stationären Bedarfen konstanter Quantitäten (= Lieferungen) aus, in der Problemstellung dieser Arbeit entsteht der Bedarf (= Reichweitenzugewinn) jedoch durch die Bewegung der Fahrzeuge und ist abhängig von Fahrzeugparametern und gefahrener Wegstrecke.

3.3.5 p-Median Model

Das *p-Median Model* nach [HAKIMI 1964] minimiert die bedarfsgewichtete durchschnittliche Entfernung der Einrichtungen zu den ihnen zugeordneten Bedarfspunkten. Die Anzahl der Standorte ist vorgegeben.

Die Gewichtung berücksichtigt unterschiedliche Quantitäten des Bedarfs, die Entfernungen zu Punkten mit höherem Bedarf haben eine größere Auswirkung auf die Standortauswahl als die Punkte mit geringem Bedarf.

Auch dieses Modell ist wegen des Optimierungsziels und der Vorgabe einer festen Anzahl von Standorten für die betrachtete Problemstellung nicht geeignet.

3.3.6 Flow Capturing Location Model (FCLM)

Das *Flow Capturing Location Model* nach [HODGSON 1990] versteht den Bedarf nicht als punktuelle sondern als fließende Größe. Bedarf wird in diesem Modell nicht einem Punkt zugeordnet, sondern einer Kante zwischen zwei Punkten. Eine solche Kante stellt

eine Wegstrecke dar, auf der sich Fahrzeuge bewegen. Der Bedarfsfluß auf einer Kante ist proportional zur Anzahl der Fahrzeuge, die die Kante passieren.

Das FCLM positioniert eine vorgegebene Anzahl von Standorten so, dass die Summe der ‚gefangenen‘ Bedarfsflüsse auf den Kanten maximiert wird. Dabei werden nur Kanten berücksichtigt, die innerhalb einer vorgegebenen maximalen Entfernung zum jeweils nächsten Standort liegen. Hier ist eine Analogie zum MCLP zu erkennen.

Das FCLM berücksichtigt, dass die Bedarfspunkte in Bewegung sind, dies ist ein großer Schritt in Richtung der in dieser Arbeit untersuchten Problemstellung. Allerdings sind auch hier die Anzahl der Standorte und ein ‚Fangradius‘ vorgegeben, was die Eignung stark einschränkt.

Das FCLM taucht in der Literatur auch unter der Bezeichnung *Flow Interception Location Model* (FILM) auf (vgl. [KIM 2010, S. 12]).

3.3.7 Generalized Flow Interception Model (GFIM)

Das *Generalized Flow Interception Model* ist eine verallgemeinerte Form für Modelle, die bei Fluss-basiertem Bedarf optimale Standorte für Einrichtungen in Netzwerken suchen (vgl. [ZENG 2007, S. 28 f.]).

GFIM berücksichtigt insbesondere, dass der Beitrag eines ‚gefangenen‘ Flusses an einem Knoten zur Zielfunktion nicht konstant ist, sondern je Kante und Knoten in einer Matrix definiert werden kann. Das FCLM/FILM kann als Sonderfall des GFIM angesehen werden.

Eine direkte Berücksichtigung von für die behandelte Problemstellung relevanten Fahrzeugparametern ist auch im GFIM nicht enthalten, ebenso bleibt es bei der Vorgabe der Anzahl von Stationen.

3.3.8 Flow Refueling Location Model (FRLM)

Das *Flow Refueling Location Model* behandelt die Positionierung von Tankstellen oder Ladestationen für Fahrzeuge mit begrenzter Reichweite (vgl. [KUBY ET AL. 2007]) und kann als Weiterentwicklung des FCLM betrachtet werden. Dieses Modell berücksichtigt, dass ein einzelner einer Kante zugeordneter Standort aufgrund der beschränkten Reichweite der Fahrzeuge möglicherweise nicht ausreichend ist, den Bedarf zu decken. Dies ist augenscheinlich so, wenn die Reichweite eines Fahrzeugs kleiner ist, als die Länge der betrachteten Wegstrecke. Aus diesem Grund nutzt das Modell Kombinationen von Standorten, die jeweils den Kanten zur Bedarfserfüllung zugeordnet werden. Das Optimierungsziel ist die Maximierung des ‚nachbetankbaren‘ Gesamtflusses.

Da auch hier die Anzahl der Standorte vorgegeben wird, ist das FRLM für die betrachtete Problemstellung wenig geeignet.

3.3.9 Deviation-Flow Refueling Location Model (DFLRM)

Das *Deviation-Flow Refueling Location Model* ist eine Erweiterung des FRLM, die Umwege zu Tankstellen bzw. Ladestationen zulässt (vgl. [KIM 2010, S. 55 f.]). In die Lösungsberechnung gehen hier Annahmen über die Bereitschaft, Umwege in Kauf zu nehmen, ein.

Das Optimierungsziel ist wiederum die Maximierung des nachbetankbaren Gesamtflusses.

Da in der Problemstellung dieser Arbeit Umwege zu Ladestationen ausgeschlossen werden sollen und die bei der Diskussion des FRLM genannte Einschränkung auch für das DFLRM gilt, ist es ebenfalls ungeeignet.

3.3.10 Cost-Optimal Infrastructure for EV-Fleets Model

Im Aufsatz „*A New Model Approach on Cost-Optimal Charging Infrastructure for Electric-Drive Vehicle Fleets*“ [HU ET AL. 2010, S. 233 f.] beschreiben die Autoren ein Modell zur kostenoptimierten Positionierung von Ladestationen in einem Verkehrsnetz. Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb bewegen sich in diesem Netz und parken an bestimmten Orten, die potentielle Standorte für Ladestationen sind.

Das Optimierungsziel ist die Minimierung der Kostensumme für die einzurichtenden Ladestationen. Das Modell ermittelt für jeden potentiellen Standort einen Kapazitätslevel, der die maximale Anzahl der dem Standort zu einer Zeitspanne zugeordneten Toursequenzen (Etappen) repräsentiert. Die Zuordnung der potentiellen Standorte zu Toursequenzen geschieht über eine Parametermatrix des Modells, die die Nähe zur Toursequenz und die technische Kompatibilität abbildet. Das Modell beschränkt die für eine Toursequenz durch einen Ladevorgang erreichbare zusätzliche Reichweite ebenfalls durch eine Parametermatrix, deren Werte aus Ladestrom und potentieller Ladezeit außerhalb des Modells zu bestimmen sind.

Sowohl das Optimierungsziel als auch die Entscheidungsvariablen dieses Modells passen zur Problemstellung. Es ist damit der erste Kandidat für eine Umsetzung in ein OPL-Modell und die Implementierung der Lösungssuche. Die Autoren planten zum Zeitpunkt der Veröffentlichung die Umsetzung des Modells mit heuristischer Lösungsstrategie. Sie zeigen die Zugehörigkeit des Modells zur Problemklasse NP (nichtdeterministisch polynomielle Rechenzeit) auf, indem sie es auf das LSCP zurückführen, das in diese Klasse gehört.

3.3.11 Locating Flow Recharging Stations Model

Y.-W. Wang beschreibt in seinem Aufsatz *“Locating Flow-Recharging Stations at Tourist Destinations to Serve Recreational Travelers“* [WANG 2011] ebenfalls ein Modell zur kostenoptimierten Positionierung von Ladestationen für Elektrofahrzeuge.

Das Optimierungsziel ist wiederum die Minimierung der Kostensumme für die einzurichtenden Ladestationen. Dieses Modell ermittelt für jeden potentiellen Standort die Anzahl nötiger Ladestationen über die Summe der erforderlichen Ladevorgänge am Standort.

Das Modell geht davon aus, dass sich die Ladestationen unmittelbar an den Aufenthaltspunkten der Fahrzeuge befinden und ohne Umwege von jedem Fahrzeug genutzt werden können. Die Fahrzeuge sind mit den Parametern Reichweite und Laderate beschrieben. Für jedes Fahrzeug gibt es für die von ihm besuchten Stationen eine angemessene Aufenthaltszeit, die zum Laden genutzt werden kann. Die durch Ladevorgänge erreichbare zusätzliche Reichweite ist eine Entscheidungsvariable und wird modellintern berechnet. Das Modell lässt auch das Beenden von Ladevorgängen vor Ende des Aufenthaltszeitraums zu.

Auch dieses Modell ist für die in der Arbeit behandelte Problematik einsetzbar, da sowohl das Optimierungsziel als auch die Entscheidungsvariablen passen. Der Autor hat das Modell bereits in einer Fallstudie erfolgreich erprobt (vgl. [WANG 2011, S. 164 f.]). Wang ordnet das Modell Problemklasse NP zu, indem er es als Variante des LSCP auffasst.

3.4 Routenfindung und Tourenplanung

3.4.1 Übersicht

Die Methoden zur Routenfindung und Tourenplanung tauchen in der Literatur häufig unter dem Begriff *Path Finding Problems* auf. In dieser Problemklasse geht es vor allem darum, wie Fahrtstrecken und Touren zeit- und/oder kostengünstig geplant werden können. Dabei soll in der Regel eine Menge von Aufträgen an Bedarfspunkten so auf vorhandene Fahrzeuge verteilt werden, dass möglichst wenige Fahrzeuge eine insgesamt möglichst geringe Gesamtfahrtzeit zur Erfüllung aller Aufträge benötigen. Lade- und Transportkapazitäten spielen hier häufig eine Rolle, aber auch zeitliche Beschränkungen wie z.B. zulässige Anlieferzeiträume.

Der erste, gewissermaßen vorgeschaltete, Teil der Lösungssuche für die Problemstellung dieser Arbeit ist die Berechnung der Touren für die Flottenfahrzeuge zu den Bedarfspunkten. Somit ist das hier beschriebene Methodenfeld neben der Standortanalyse und -planung ebenfalls relevant.

Die Abbildung 6 zeigt die nachfolgend behandelten Modelle zu Path Finding Problems aus der Literatur in der Übersicht. Dabei sind für jedes Modell das Optimierungsziel (O), die Entscheidungsvariablen (V) sowie die Parameter (P) aufgeführt.

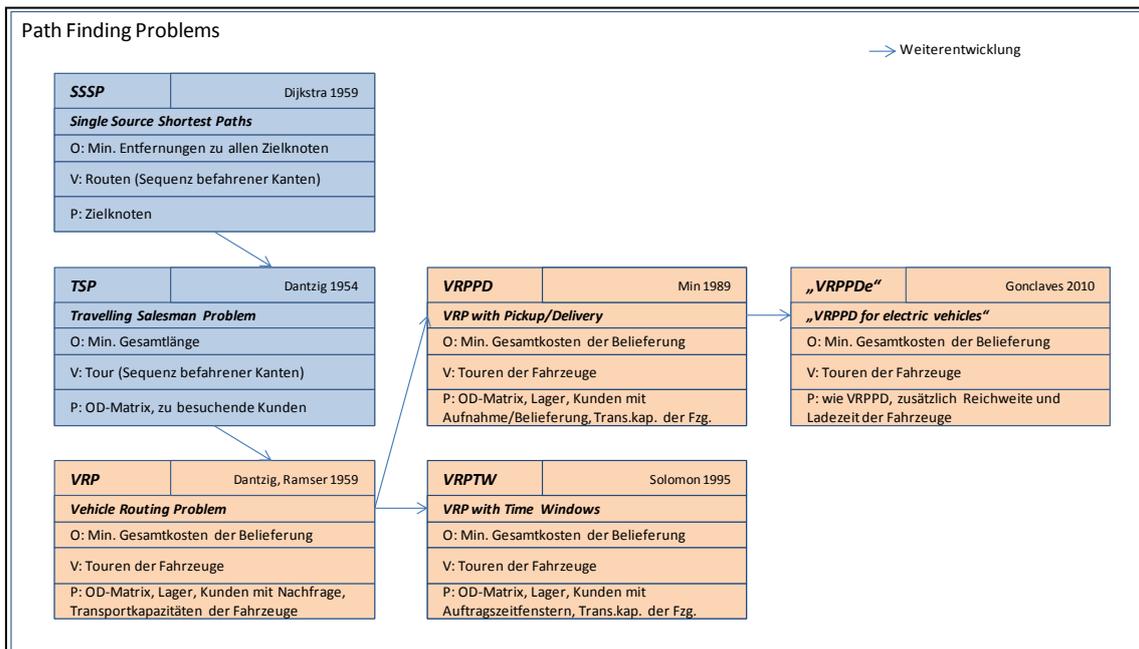


Abbildung 6: Überblick Path Finding Problems

3.4.2 Single Source Shortest Paths Problem (SSSP)

Grundlage für alle Path Finding Problems ist die Berechnung der kürzesten Wege zwischen Knoten. Das *Single Source Shortest Paths Problem* ermittelt von einem Knoten aus die kürzesten Wege zu allen anderen Knoten in einem gegebenen Wegenetz. Ein effizientes Verfahren zur Lösung des Verfahrens ist der Algorithmus von Dijkstra (vgl. Beschreibung in [DIJKSTRA 1959] und Darstellung in [MEX 2009, S. 16 f.]).

3.4.3 Travelling Salesman Problem (TSP)

Das *Travelling Salesman Problem* sucht die kürzeste Tour von einem gegebenen Startpunkt (Depot) aus über eine spezifizierte Menge von zu besuchenden Punkten zurück zum Ausgangspunkt (vgl. [DANTZIG ET AL. 1954]). Das TSP ist ein in der Literatur intensiv diskutiertes Problem, das in vielfältiger Weise formuliert (z.B. als MIP) und mit verschiedensten Methoden gelöst wird. Eine ausführliche Übersicht zur Geschichte, den Meilensteinen der Lösungsfindung und zur Anwendung des TSP findet sich in [COOK 2012].

3.4.4 Vehicle Routing Problem (VRP, VRPPD, VRPTW, ...)

Während das TSP ein einzelnes Fahrzeug betrachtet, geht es beim *Vehicle Routing Problem (VRP)* um die Berechnung der Touren für die Fahrzeuge einer ganzen Flotte, die über bestimmte Kapazitäten verfügen und von einem Depot aus operieren. Dabei ist hier die kostengünstigste Lösung gefragt, um alle Aufträge bzw. Bedarfe zu erfüllen (siehe *Truck Dispatching Problem* in [DANTZIG ET AL. 1959]).

Ziel ist die Optimierung der Gesamttransportkosten, die von der zurückgelegten Wegstrecke (Treibstoffkosten), der aufgewendeten Zeit (Personalkosten) und von der Anzahl tatsächlich eingesetzter Fahrzeuge abhängt.

Das VRP ist als Problemgruppe mit zahlreichen Varianten zu verstehen; die Varianten ergeben sich aus Nebenbedingungen wie Kapazitätsrestriktionen für Anlieferung oder Abholung von Gütern (*VRP with Pickup/Delivery*, VRPPD, vgl. [MIN 1989]) oder Zeitfenstern, in denen die Auftragserfüllung erfolgen muss (*VRP with Time Windows*, VRPTW, vgl. [TOTH ET AL. 2001, S. 157 f.]). VRPs gelten als schwierig zu lösen (Problemklasse NP) und werden in der Regel mit heuristischen Verfahren behandelt (vgl. [SUHL ET AL. 2009, S. 247f.]).

Eine Übersicht zu den Varianten des VRP und eine Aufstellung verschiedener Lösungstechniken finden sich in [BARNABE 2006].

Der VRP-Problemtyp ist im Kontext der Aufgabenstellung hilfreich für die erste Stufe der Lösungssuche, die Tourenplanung. Die Touren als Lösungselemente des VRP können unmittelbar als Eingabeparameter für das Kernproblem, die Standortoptimierung für die Ladestationen, aufgefasst werden.

3.4.5 VRPPD for Electric Vehicles

Im Aufsatz "*Optimization of a Distributed Network using Electric Vehicles*" [GONCLAVES 2010] beschreibt der Autor eine Erweiterung des VRPPD um zwei Parameter und eine Entscheidungsvariable.

Die Reichweite bei voller Batterie und die Aufladezeit kommen als Parameter hinzu, die neue Entscheidungsvariable zählt je Fahrzeug die nötigen Ladevorgänge. In einer neuen Restriktionsgleichung wird aus der Division der Gesamtlänge jeder Tour durch die Reichweite je Fahrzeug die Anzahl der nötigen Ladevorgänge belegt. Das Produkt aus Anzahl der Ladevorgänge und der Aufladezeit kommt als zusätzliche additive Komponente für die Gesamtzeitrestriktion hinzu.

Der Ansatz ist für die Problemstellung dieser Arbeit nicht relevant, da die Ladezeiten nicht als zusätzlicher Zeitbedarf verstanden werden, sondern innerhalb der zur Erfüllung des Auftrags nötigen Zeit liegen sollen.

3.5 Standortplanung mit einem Geoinformationssystem

Die in heutigen Geoinformationssystemen vorhandenen Funktionalitäten zur Pflege, Anzeige und Analyse räumlicher Daten sind vielfältig. Der Schwerpunkt der folgenden Abschnitte ist auf die Funktionen zur Standortanalyse und zur Tourenplanung gelegt, die möglichst in die prototypische Umsetzung des Lösungsverfahrens einbezogen werden sollen.

Der Markt für Geoinformationssysteme ist heute von wenigen kommerziellen Herstellern dominiert (ESRI, Intergraph, Pitney Bowes Software), wobei es durchaus frei verfügbare Softwarelösungen (GRASS, Quantum GIS, etc.) gibt.

In dieser Arbeit wird auf das Produkt *ESRI ArcGIS Desktop 10.0* zurückgegriffen, da es im Projektkontext verfügbar und dort bereits weithin etabliert ist. Die nachfolgend beschriebenen Informationen zu Produktkomponenten und -eigenschaften sind der Online-Hilfe aus [ESRI 2012 (1)] und [ESRI 2012 (2)] entnommen.

3.5.1 Geodatenmanagement

Für Standortplanung und Tourenplanung sind Geodaten erforderlich, die ein routingfähiges Wegenetz des Untersuchungsgebietes abbilden. Dazu sind folgende Elemente nötig:

- Knoten als Orte von Bedarfspunkten und als Verbindungspunkte zwischen Kanten,
- Kanten als Wegstrecken, die Knoten verbinden,
- Konnektivitätsregeln sowie Abbiegevorschriften und -verbote, die Verbindungen und Übergangsregeln zwischen Kanten beschreiben,
- Punkt- oder linienförmige Barrieren, die Sperren darstellen oder die fahrbare Geschwindigkeit verringern,
- Attribute wie Durchschnittsgeschwindigkeiten, Zulassung für bestimmte Fahrzeugtypen, etc.

Für die betrachtete Aufgabenstellung ist unter Umständen eine hohe Abdeckung auch kleinster Wege und in Gebieten abseits der herkömmlichen Straßennavigation (z.B. auf Flughäfen oder Betriebsgeländen) erforderlich. Zur kartografischen Visualisierung der Ergebnisse ist darüber hinaus hintergrundfähiges Material wie z.B. Satellitenbilder sinnvoll.

Für die benötigten Geodaten gibt es verschiedene mögliche Quellen und Anbieter.

Kommerzielle Anbieter wie NAVTEQ [NAVTEQ 2012] erreichen eine sehr hohe Abdeckung und Datenqualität, die Abdeckung von Gebieten abseits der Straßennavigation ist jedoch häufig weniger ausgeprägt. Die Routingfähigkeit des Datenmaterials ist gegeben, häufig existieren bereits auf GIS-Systeme zugeschnittene Pakete, wie z.B. *ESRI Streetmap Premium* [ESRI 2012 (3)].

Offene Geodaten wie z.B. OpenStreetMap [OSM 2012 (1)] sind ohne Lizenzkosten nutzbar. Die Erfassung geschieht in Gemeinschaftsarbeit aller Nutzer, also nicht ausschließlich durch die Mitarbeiter eines Unternehmens. Die Nutzer dürfen die Daten auch verändern, daraus ergeben sich ggf. Fragestellungen zur Vollständigkeit, Korrektheit und Aktualität. Die Qualität ist in vielen Gebieten aber bereits hervorragend (vgl. [PETERS 2010, S. 14 f.]). Zur Integration von OSM-Daten als routingfähige Wegenetze in marktgängige GIS-Systeme ist derzeit noch ein gewisser Aufwand erforderlich. Ein entsprechender Ansatz und die programmatische Umsetzung *OSM2NetworkDataset* sind in [PETERS 2010] beschrieben.

Schließlich können Geodaten von einem **Auftraggeber** – wie z.B. einem Großbetrieb oder einem Flughafen – bereitgestellt werden, auch hier stellt sich die Frage nach Vollständigkeit und Eignung sowie der Integration in das GIS-System.

Die **Speicherung** der Geodaten kann im Rahmen dieser Arbeit in einer *ESRI ArcGIS File Geodatabase* stattfinden, die räumliche und nicht-räumliche Daten in einer Sammlung von Dateien in einem Ordner auf einem Datenträger zusammenfasst und die Verwaltung und Abfrage von Datensätzen ermöglicht. Die Administration und das Laden sowie Transformationen der Inhalte der File Geodatabase kann mit dem Programm *ArcCatalog* erfolgen, das Bestandteil des Produktes *ESRI ArcGIS Desktop* ist.

3.5.2 Anzeige und Visualisierung

Das Programm *ArcMap* aus dem Produkt *ESRI ArcGIS Desktop* dient der Anzeige von Geodaten in Form einer Sammlung von Layern, die übereinandergelegt und unabhängig voneinander ein- und ausgeblendet werden können. Für die Visualisierung von attributiven Informationen zu räumlichen Objekten können die Layer mit vielfältigen Symbolgien und Signaturen hinterlegt werden.

Darüber hinaus ermöglicht *ArcMap* das Editieren von Geodaten sowie die Anwendung von geografischen Transformationen. Eine Reihe von speziellen Erweiterungen zur räumlichen Analyse, wie der *Spatial Analyst* oder der *Network Analyst* werden von *ArcMap* aus angesteuert.

Eigene Erweiterungen des Funktionsumfangs von *ESRI ArcGIS Desktop* können in *ArcMap* als sogenannte *AddIns* integriert werden.

3.5.3 Analyse

Die netzwerkbezogenen Analysemöglichkeiten von ESRI ArcGIS sind zum größten Teil in der *ArcGIS Network Analyst Extension* gebündelt. Network Analyst ermöglicht die Modellierung, Erzeugung und Administration von Verkehrsnetzen und stellt einige Analysemöglichkeiten bereit.

Die grundlegende Datenstruktur des Network Analyst ist das *Network Dataset*. Network Datasets verknüpfen räumliche Objekte (*Features*, z.B. Wegstrecken, Kreuzungspunkte, Knoten, etc.) über Verbindungsregeln und Restriktionen so miteinander, dass ein routingfähiges Wegenetz als realistisches Abbild eines realen Verkehrsnetzes entsteht. Dabei finden auch weitere Attribute wie durchschnittlich gefahrene Geschwindigkeiten oder das Verkehrsaufkommen Berücksichtigung. Auf einem Network Dataset können mit dem Network Analyst eine Reihe von Netzwerkproblemen modelliert und gelöst werden.

Das Netzwerkproblem **Route** findet den optimalen Weg von einem Standort zu einem anderen oder die optimale Route durch mehrere Standorte, wobei auch die beste Reihenfolge ermittelt werden kann. Es können verschiedene Kostenattribute wie Zeit und Entfernung definiert werden. Dieses Netzwerkproblem bildet die Modelle SSSP und TSP aus der Literatur ab (siehe Seite 38 f.). Als Lösungsverfahren wird der Algorithmus von Dijkstra [DIJKSTRA 1959] genutzt. Für die Ermittlung der optimalen Reihenfolge wird auf die Meta-Heuristik Tabu Search zurückgegriffen (vgl. Seite 29 f.).

Das Netzwerkproblem **Nächste Einrichtung** (Closest Facility) findet zu einem oder mehreren Ereignisorten die nächstgelegenen Einrichtungen. ‚Nächstgelegen‘ kann dabei sowohl zeitlich als auch entfernungsbezogen definiert sein. Die Anzahl der zu berücksichtigenden Einrichtungen je Ereignis kann dabei über eine maximale Fahrtzeit oder Entfernung eingeschränkt werden. Das Lösungsverfahren basiert ebenfalls auf dem Dijkstra-Algorithmus.

Die Ermittlung der **Einzugsgebiete** (Service Areas) ist ein Netzwerkproblem, bei dem alle innerhalb einer zeitlichen oder entfernungsbasierten Entfernung erreichbaren Netzwerkelemente in der Umgebung eines Standorts ausgewählt werden. Das implementierte Lösungsverfahren geht auch auf den Dijkstra-Algorithmus zurück.

Der Network Analyst behandelt ebenfalls das **Vehicle Routing Problem**, bei dem es um die Tourenplanung für eine Fahrzeugflotte geht. Dieses Netzwerkproblem ordnet die Fahrzeuge den zu besuchenden Kunden zu und ermittelt die optimalen Besuchsreihenfolgen. Das Optimierungsziel kann hier auf Gesamtentfernung, Gesamtzeit oder aber auch auf eine Kostenfunktion aus Verbrauchskosten, Fahrzeitkosten, Einsatzkosten, o.ä. bezogen sein. Network Analyst berücksichtigt Zeitfenster und Kapazitäten zur Belieferung oder Abholung bei den Kunden. Hier ist das aus der Literatur bekannte VRP (siehe

Seite 39 f.) mit seinen Varianten VRPPD und VRPTW abgebildet. Das Lösungsverfahren stützt sich ebenfalls auf die Tabu Search Meta-Heuristik.

Das Netzwerkproblem **Location-Allocation** bestimmt aus einer Gruppe von potentiellen Standorten diejenigen, an denen Einrichtungen zur Erfüllung des Bedarfs an den Bedarfspunkten nötig sind. Unter Location-Allocation sind verschiedene Problemtypen zusammengefasst, unter anderem die Minimierung von Gesamtentfernung oder –zeit, die Maximierung der Flächenabdeckung, die Minimierung der Anzahl Einrichtungen oder die Maximierung der Erreichbarkeit. Die genannten Problemtypen gehen direkt auf die ab Seite 32 beschriebenen Grundprobleme p-Median, MCLP und LSCP zurück. Als Lösungsverfahren werden verschiedene Heuristiken eingesetzt.

Die Bestimmung der **Start-Ziel-Kostenmatrix** (Origin-Destination Cost Matrix, OD-Matrix) ist als Vorstufe Bestandteil einiger der vorgenannten Netzwerkprobleme, z.B. des Vehicle Routing Problems. Die Start-Ziel-Kostenmatrix ist eine Tabelle mit den zeitlichen oder entfernungsbasierten Distanzen von jedem Startpunkt zu jedem Zielpunkt des Netzwerks. Dabei lässt sich eine maximal zu berücksichtigende Distanz angeben. Als Lösungsverfahren wird der Algorithmus von Dijkstra genutzt.

3.5.4 Programmierschnittstelle

Das *ArcObjects Software Development Kit (SDK)* erlaubt die Entwicklung eigener Anwendungen unter Nutzung des *ArcObjects Application Programming Interface (API)*. Diese Anwendungen können selbstständig lauffähig (stand alone) oder als Erweiterung in Form eines *AddIns* mit individuellen Werkzeugleisten, Schaltknöpfen und Auswahlboxen in ArcMap integriert werden.

ArcObjects ist als COM-basiertes Objektmodell die Grundlage, auf der auch alle Komponenten des ESRI ArcGIS Desktop aufgebaut sind. Die gesamte im letzten Abschnitt beschriebene Funktionalität der Network Analyst Extension ist als Teilmodell *Network Analyst Object Model* in ArcObjects enthalten und für eigene Entwicklungen verfügbar.

Ein auf der .net-Technologie basiertes API ermöglicht die Programmierung mit ArcObjects in der Sprache C#. Die Installation des SDK bringt Vorlagen (Templates) zur Vereinfachung der Entwicklungsarbeit in die .net-Entwicklungsumgebung *Microsoft Visual Studio* ein. Ebenso werden wiederverwendbare Codesegmente (Snippets) eingestellt.

Für weitere Informationen zum SDK und zu ArcObjects sei auf [HÖCK ET AL. 2011] verwiesen.

3.6 Schlussfolgerungen und Lösungsidee

Die vorangehenden Abschnitte haben gezeigt, dass es im Methodenfeld Operations Research und im Technologiebereich der Geoinformationssysteme einige Elemente und Komponenten gibt, die bei der Erarbeitung eines Verfahrens und einer prototypischen Implementierung zur Standortoptimierung von Ladestationen von großem Nutzen sind.

Aus dem Feld der Optimierungsprobleme ist das Vehicle Routing Problem (VRP) geeignet, den ersten Teil der Lösungssuche, die Tourenplanung zur Erfüllung der Aufträge an den Bedarfspunkten, abzubilden. Die Erstellung und Lösung von VRPs ist mit der Komponente Network Analyst des Geoinformationssystems ESRI ArcGIS Desktop möglich.

Die Literaturstudie hat zwei Optimierungsmodelle aus dem Bereich Standortoptimierung identifiziert, die zur Kernproblematik, der Bestimmung der an den Bedarfspunkten erforderlichen Ladestationen, passen. Im Funktionsumfang des Network Analyst findet sich leider kein passendes Optimierungsmodell (Netzwerkproblem), das zur Lösungsfindung genutzt werden kann.

Diese Arbeit wird die Lücke durch eine Eigenwicklung schließen. Dabei wird auf dem Modell „Location Flow Recharging Stations“ von Y.-W. Wang aufgesetzt. Der Autor berichtet bereits von einer erfolgreichen Umsetzung und Erprobung an einem konkreten Szenario, dies trifft auf das zweite, ebenfalls passende, Optimierungsmodell nicht zu. Das Modell ist allerdings zunächst detailliert zu prüfen, ggf. anzupassen oder zu erweitern und dann mit dem IBM ILOG CPLEX Optimization Studio in OPL zu formulieren. Über das ArcObjects SDK ist eine Erweiterung zu programmieren, die die Tourenplanung aus einem gelösten VRP in ArcMap ausliest und als Eingabe an das OPL-Modell „Location Flow Recharging Stations“ übergibt, die Lösungssuche aufruft und schließlich das Ergebnis in ArcMap anzeigt.

Das Geoinformationssystem ESRI ArcGIS Desktop kann als ‚Werkbank‘ für das generische Verfahren eingesetzt werden, es ermöglicht die Erfassung, Speicherung und Verwaltung der Sach- und Geodaten (Wegenetze, Bedarfspunkte, Aufträge, Fahrzeuge, Network Datasets) und stellt Funktionen zur kartografischen Visualisierung bereit.

Das folgende Kapitel beschreibt nun die Implementierung dieser Lösungsidee.

4 Implementierung und Integration der Lösung

Dieses Kapitel beschreibt die Lösungsarchitektur, die Entwicklung der einzelnen Lösungsbestandteile sowie deren Integration zu einer Arbeitsumgebung, die das im letzten Abschnitt beschriebene generische Vorgehensmodell unterstützt.

4.1 Architekturübersicht

Der erste Abschnitt stellt die Architektur als Gesamtübersicht vor. Die anschließenden Abschnitte erläutern die wesentlichen Komponenten im Detail und zeigen ein generisches Verfahren, das auf Basis der Lösungsarchitektur für die optimale Standortsuche von Ladestationen in beliebigen Szenarien eingesetzt werden kann.

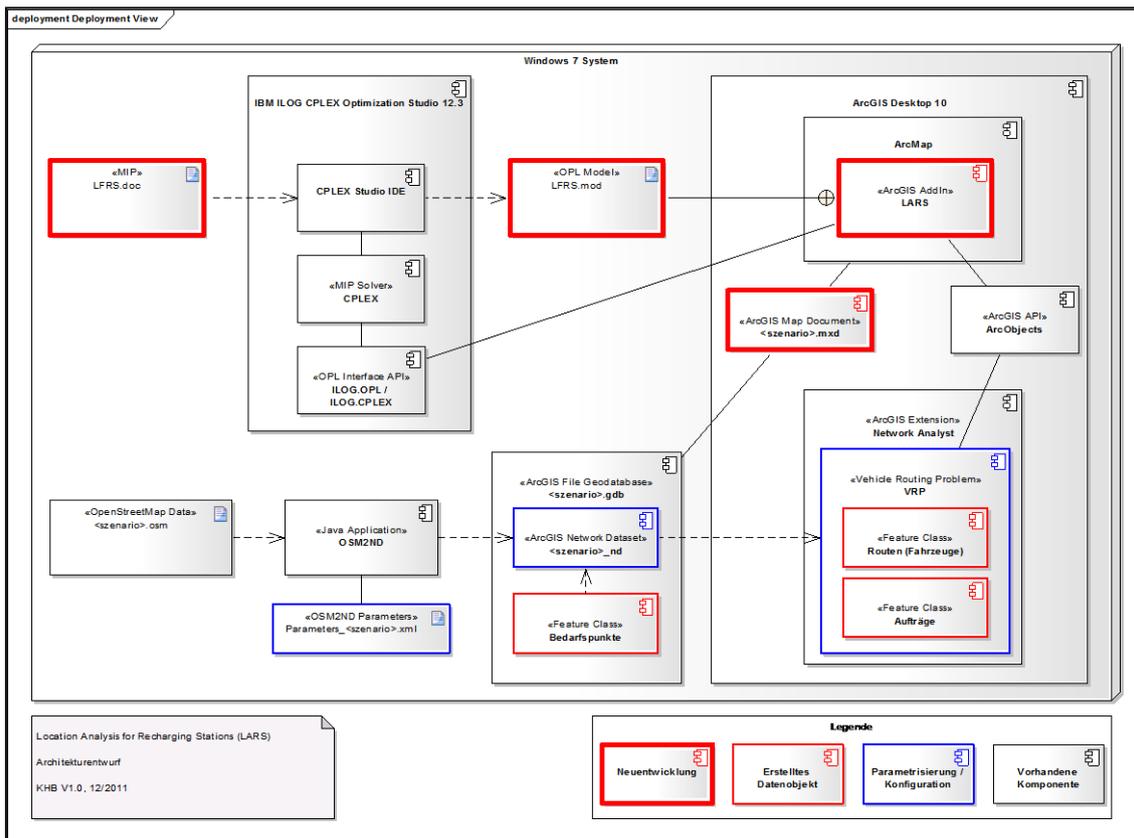


Abbildung 7: Architekturübersicht der Lösung

Wie Abbildung 7 zeigt, ist die erste wesentliche Komponente ein mathematisches Modell zu dem als Mixed Integer Problem (MIP) formulierten Optimierungsproblem der

Standortsuche. Die Textdatei *LFRS.doc* enthält eine formale Beschreibung des dazu in dieser Arbeit entwickelten Modells.

In der CPLEX Studio Entwicklungsumgebung wird das mathematische Modell in der Optimierungssprache OPL formuliert (*LFRS.mod*).

Das entwickelte ArcGIS Desktop AddIn *LARS*² ermöglicht die Einstellung der Parameter Laderate und Reichweite, übernimmt die benötigten Variablen wie Fahrzeuge und Routen aus einem Vehicle Routing Problem (*VRP*), steuert den Aufruf des CPLEX-Solvers über die *OPL Interface API* und stellt die Ergebnisse dar. Dabei wird ein *ArcGIS Map Document* verwendet, das die anzuzeigenden Layer mit ihrer Symbologie und die Verweise zu den Datenquellen beinhaltet.

Die *ArcGIS File Geodatabase* enthält die Bedarfspunkte und ein *ArcGIS Network Dataset* mit dem routingfähigen Wegenetz zum betrachteten Szenario.

Da in vielen Fällen routingfähige Geodaten nicht vorliegen dürften, sieht die Lösungsarchitektur den Einsatz des Tools *OSM2NetworkDataset* vor, das aus einem Datenextrakt von OpenStreetMap ein ArcGIS Network Dataset generieren kann.

² *LARS* steht für Location Aalysis for Recharging Stations

4.2 Mathematisches Optimierungsmodell LFRS

„Mach' dir keine Sorgen wegen deiner Schwierigkeiten mit der Mathematik. Ich kann dir versichern, daß meine noch größer sind.“

Albert Einstein

Dieser Abschnitt erläutert das in dieser Arbeit erarbeitete mathematische Optimierungsmodell *LFRS*³. Ausgangspunkt ist das Modell von Y.-W. Wang aus [WANG 2011], das zunächst in aller Kürze wiedergegeben ist.

Mengen (nach Wang):

- N Knoten (Bedarfpunkte), potentielle Standorte für Ladestationen
- A Pfade zwischen den Knoten
- M Fahrzeuge

Parameter (nach Wang):

- c_i Kosten der Einrichtung einer Ladestation im Knoten i
- u_i Maximale Anzahl der im Knoten i installierbaren Ladestationen
- d_{ij} Wegegebundene Entfernung vom Knoten i zum Knoten j (in km)
- δ_{ijm} Falls Pfad von Knoten i zu j von Fahrzeug m genutzt wird:
 $\delta_{ijm} = 1$, sonst $\delta_{ijm} = 0$
- t_{im} Zeit zur Auftragserfüllung im Knoten i für das Fahrzeug m ,
potentielle Ladezeit (in min)
- α Initiale Reichweite am Beginn der Tour (in km)
- β Laderate in km/min, Reichweitenzugewinn pro Zeiteinheit
- γ Batteriekapazität (max. Reichweite in km)

³ *LFRS* steht für **L**ocating **F**low **R**echarging **S**tations

Entscheidungsvariablen (nach Wang):

X_i	Wenn im Knoten i Ladestationen eingerichtet sind: $X_i \geq 0$, sonst $X_i = 0$
Y_{im}	Wenn Fahrzeug m im Knoten i geladen wird: $Y_{im} = 1$, sonst $Y_{im} = 0$
I_{im}	Koeffizient für ungenutzte Ladezeit des Fahrzeugs m im Knoten i (in km)
r_{im}	Reichweitenzugewinn durch Ladevorgang des Fahrzeugs m im Knoten i (in km)
b_{im}	Restreichweite des Fahrzeugs m bei Erreichen des Knotens i (in km)

Zielfunktion (nach Wang)

$$\text{Minimiere } \sum_{i \in N} c_i X_i \quad (ct1)$$

Restriktionen (nach Wang)

$$b_{im} = (b_{jm} + r_{jm}) - d_{ji} \times \delta_{jim} \quad \forall j \in A, \forall m \in M, \quad (ct2)$$

$$r_{im} = Y_{im} \times t_{im} \times \beta - I_{im} \quad \forall i \in N, \forall m \in M, \quad (ct3)$$

$$r_{im} \leq \gamma - b_{im} \quad \forall i \in N, \forall m \in M, \quad (ct4)$$

$$\sum_{m \in M} Y_{im} \leq X_i \quad \forall i \in N, \quad (ct5)$$

$$X_i \leq u_i \quad \forall i \in N, \quad (ct6)$$

$$Y_{im} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, \forall m \in M, \quad (ct7)$$

$$X_i, I_{im}, b_{im}, r_{im} \geq 0 \quad \forall i \in N, \forall m \in M \quad (ct8)$$

Formel 1: Locating Flow-Recharging Stations Model nach Y.-W. Wang

Die Entscheidungsvariable X_i soll eine ganzzahlige Variable sein, die die Anzahl der im Knoten i einzurichtenden Ladestationen abbildet. Die folgende Formulierung bringt dies deutlicher zum Ausdruck:

X_i	Wenn im Knoten i Ladestationen eingerichtet sind: $ X_i = \text{Anzahl der in } i \text{ eingerichteten Ladestationen, sonst } X_i = 0$
-------	---

Die Zielfunktion ist in (ct1) formuliert. Sie bildet das auf der Seite 24 festgelegte Optimierungsziel ab. Die Restriktion (ct2) beschreibt die Berechnung der Restreichweite und entspricht damit der 2. Randbedingung von Seite 24. Die vorliegende Formulierung

von Wang ist jedoch noch nicht ausreichend. In (ct2) sind *alle* Pfade $\forall ji \in A$ betrachtet. Der Wert für δ_{jim} ist immer dann 0, wenn ein Fahrzeug m den Pfad von j nach i nicht befährt. Aus (ct2) wird in diesem Fall aber trotzdem für den Knoten i eine Reichweite von $b_{im} = (b_{jm} + r_{jm})$ gefordert – dies kann einen Widerspruch darstellen und das Problem unlösbar machen. Eine alternative Formulierung, in der nur tatsächlich befahrene Pfade berücksichtigt werden, ist:

$$b_{im} = \sum_{j \in N} \left((b_{jm} + r_{jm} - d_{ji}) \times \delta_{jim} \right) \quad \forall i \in N, \forall m \in M \quad (ct2')$$

In (ct2') werden für jeden Knoten i Summen für alle möglichen Vorgängerknoten j gebildet. Da das Fahrzeug von genau einem oder keinem Vorgängerknoten aus kommen kann, ist δ_{jim} und damit der gesamte Summand für genau ein oder kein j ungleich 0.

Die Restriktion (ct3) beschreibt den Reichweitzugewinn durch Aufladen und geht auf die auf Seite 24 aufgeführte 3. Randbedingung zurück. Die Entscheidungsvariable I enthält dabei den Teil des möglichen Reichweitzugewinns, auf den verzichtet wird.

Die Restriktion (ct4) beschränkt den Reichweitzugewinn auf die aufgrund der Batteriekapazität gegebene maximale Reichweite, das ist die 4. Randbedingung aus der Definition der Problemstellung.

Die Restriktion(ct5) stellt sicher, dass für die Ladevorgänge ausreichend Ladestationen vorgesehen sind, hier ist die 5. Randbedingung von Seite 24 umgesetzt.

Die Gleichungen (ct6) bis (ct8) beschränken die Wertebereiche der Entscheidungsvariablen, so ist insbesondere auch die 1. Randbedingung aus der Problemstellung abgedeckt.

Bei näherer Betrachtung des Modells von Wang fällt auf, dass es Mehrfachbesuche von Bedarfspunkten durch dasselbe Fahrzeug nicht abbilden kann. Diese Problematik ist zum Beispiel daran erkennbar, dass die Entscheidungsvariable b_{im} für die Restreichweite je Fahrzeug und Knoten nur einen einzigen Wert annehmen kann, dies ist bei mehrfachen Besuchen eines Knotens in einer Tour nicht ausreichend.

Um diesen Mangel zu beseitigen, wird das Modell von Wang in dieser Arbeit wie nachfolgend beschrieben weiterentwickelt. Die wesentliche Neuerung ist die Einführung von Sequenzen (= Touren) als geordnete Menge der Besuchsreihenfolgen der Knoten durch die Fahrzeuge. Einige Parameter und Entscheidungsvariablen des Modells erhalten aus diesem Grund einen weiteren Index s zur Referenzierung der Sequenzelemente (= Etappen). Ebenso sind die Restriktionsgleichungen entsprechend angepasst und erweitert.

Das Modell **LFRS** bezieht sich auf folgende **Mengen**:

- N Knoten (Bedarfspunkte), potentielle Standorte für Ladestationen
 M Fahrzeuge
 S Sequenzen (Touren), Besuchsreihenfolgen der Knoten durch die Fahrzeuge

Die **Parameter** des Modells LFRS sind:

- c_i Kosten der Einrichtung einer Ladestation im Knoten i
 u_i Maximale Anzahl der im Knoten i installierbaren Ladestationen
 $d_{i,j}$ Wegegebundene Entfernung vom Knoten i zum Knoten j (in km)
 $\delta_{i,m,s}$ Falls Knoten i von Fahrzeug m bei Sequenzelement (Etappe) s besucht wird: $\delta_{i,m,s} = 1$, sonst $\delta_{i,m,s} = 0$
 $t_{i,m,s}$ Zeit zur Auftrags Erfüllung im Knoten i für das Fahrzeug m bei Sequenzelement (Etappe) s , potentielle Ladezeit (in min)
 α Initiale Reichweite am Beginn der Tour (in km)
 β Laderate in km/min, Reichweitenzugewinn pro Zeiteinheit
 γ Batteriekapazität (max. Reichweite in km)

Die folgenden **Entscheidungsvariablen** werden in LFRS verwendet:

- X_i Wenn im Knoten i Ladestationen eingerichtet sind:
 $|X_i| =$ Anzahl der in i eingerichteten Ladestationen, sonst $X_i = 0$
 $Y_{i,m,s}$ Wenn Fahrzeug m im Knoten i bei Sequenzelement (Etappe) s geladen wird:
 $Y_{i,m,s} = 1$, sonst $Y_{i,m,s} = 0$
 $l_{i,m,s}$ Koeffizient für ungenutzte Ladezeit im Knoten i für das Fahrzeug m bei Sequenzelement (Etappe) s (in km)
 $r_{i,m,s}$ Reichweitenzugewinn durch Ladevorgang im Knoten i für das Fahrzeug m bei Sequenzelement (Etappe) s (in km)
 $b_{i,m,s}$ Restreichweite im Knoten i des Fahrzeugs m bei Sequenzelement (Etappe) s (in km)

Zielfunktion des LFRS

$$\text{Minimiere } \sum_{i \in N} c_i X_i \quad (ct1)$$

Restriktionen des LFRS

$$b_{i,m,s} = \sum_{j \in N} \left((b_{j,m,s-1} + r_{j,m,s-1} - d_{ji}) \times \delta_{i,m,s} \times \delta_{j,m,s-1} \right) \quad \forall i \in N, \forall m \in M, \forall s \in S, \quad (ct2)$$

$$r_{i,m,s} = Y_{i,m,s} \times t_{i,m,s} \times \beta - I_{i,m,s} \quad \forall i \in N, \forall m \in M, \forall s \in S, \quad (ct3)$$

$$r_{i,m,s} \leq \gamma - b_{i,m,s} \quad \forall i \in N, \forall m \in M, \forall s \in S, \quad (ct4)$$

$$\sum_{m \in M} \max_{s \in S} \{Y_{i,m,s}\} \leq X_i \quad \forall i \in N, \quad (ct5)$$

$$X_i \leq u_i \quad \forall i \in N, \quad (ct6)$$

$$Y_{i,m,s} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, \forall m \in M, \forall s \in S, \quad (ct7)$$

$$X_i, I_{i,m,s}, b_{i,m,s}, r_{i,m,s} \geq 0 \quad \forall i \in N, \forall m \in M, \forall s \in S \quad (ct8)$$

Formel 2: Mathematisches Optimierungsmodell LFRS

Die Formel 2 zeigt das weiterentwickelte Optimierungsmodell LFRS mit der bereits bekannten Zielfunktion und den erweiterten Restriktionen. Die entscheidende Neuerung des Modells LFRS – die Einführung der Sequenzen – führt insbesondere zu einer signifikanten Erweiterung der Restriktion (ct5). Hier ist nun sichergestellt, dass mehrfache Ladevorgänge eines Fahrzeugs am gleichen Bedarfspunkt den Bedarf an Ladestationen nicht erhöhen. Die Anzahl nötiger Ladestationen wird nun nicht mehr wie im Modell von Wang durch die Anzahl von Besuchen insgesamt, sondern durch die Anzahl von Besuchen *unterschiedlicher* Fahrzeuge ermittelt.

4.3 Formulierung des LFRS als OPL-Model

Das im letzten Abschnitt vorgestellte mathematische Modell ist im nächsten Schritt in ein Optimierungsprogramm mit IT-gerechter Darstellung und standardisierten Datenstrukturen zu überführen, damit es mit Hilfe einer Optimierungssoftware verarbeitet und gelöst werden kann.

Die Abbildung 8 zeigt die Implementierung des mathematischen Modells in der Optimierungssprache *OPL* (Optimization Programming Language). *OPL* ist die im IBM ILOG CPLEX Optimization Studio verwendete Standardnotation.

Die Gesamtheit der auf den Wert „...“ zugewiesenen Variablen beschreiben eine Problem Instanz, die Belegung dieser Variablen wird vor dem Start der Lösungssuche eingelesen. Die Eingabedaten für eine Problem Instanz kommen im einfachsten Fall aus einer Datei. Für die Lösungssuche wird der CPLEX-Solver genutzt.

Die Formulierung einer konkreten Problem Instanz, die das Beispiel aus der Definition der Problemstellung aufgreift (vgl. Seiten 18 und 25), ist in Abbildung 9 gezeigt.

```

int AnzKnoten = ...;
range Knoten = 0..AnzKnoten-1; //Menge N

tuple delta {
  key int i; //aus N
  key string m; //aus M
  key int s; //aus S
  float t; //Attribut Service-Zeit
}
{delta} Touren = ...; //Parameter delta -> Touren

tuple p {
  key int i; //aus N
  key string m; //aus M
};

// Hilfsparameter, Liste der besuchten Knoten je Fahrzeug
{p} Stopps = { <i,m> | <i,m,s,t> in Touren };

float KostenStation[Knoten] = ...; //Parameter c[i]
int MaxStationen[Knoten] = ...; //Parameter u[i]
float Entfernung[Knoten][Knoten] = ...; //Parameter d[ij]

float InitReichweite = ...; //Parameter alpha
float Laderate = ...; //Parameter beta
float Kapazitaet = ...; //Parameter gamma

dvar int+ AnzStationen[Knoten]; //Entscheidungsvariable X, (ct8)
dvar boolean Aufladen[Touren]; //Entscheidungsvariable Y, (ct7)
dvar float+ Anpassungswert[Touren]; //Entscheidungsvariable I, (ct8)
dvar float+ Reichweitengewinn[Touren]; //Entscheidungsvariable r, (ct8)
dvar float+ Restreichweite[Touren]; //Entscheidungsvariable b, (ct8)

//Optimierungsziel, (ct1)
minimize
  sum( i in Knoten )
    KostenStation[i] * AnzStationen[i];

//Restriktionen, (ct2)-(ct6)
subject to{
  forall(r in Touren) //nur für tatsächlich befahrene Pfade
  {
    ct2:
      if (r.s == 1) //jeweils erste Sequenzen der Touren
        Restreichweite[r] == InitReichweite;
      else
        Restreichweite[r] == Restreichweite[prev(Touren,r)]
          + Reichweitengewinn[prev(Touren,r)]
          - (Entfernung[prev(Touren,r).i][r.i]);

    ct3:
      Reichweitengewinn[r] == Aufladen[r] * r.t * Laderate
        - Anpassungswert[r];

    ct4:
      Reichweitengewinn[r] <= Kapazitaet - Restreichweite[r];
  };
  forall( i in Knoten)
  {
    ct5:
      sum(p in Stopps : p.i == i)
        max(r in Touren : p.m == r.m && r.i == i)
          Aufladen[<r.i,r.m,r.s>] <= AnzStationen[i];

    ct6:
      AnzStationen[i] <= MaxStationen[i];
  };
}

```

Abbildung 8: LFRS als OPL-Model

```

AnzKnoten = 5;           //Knoten 0-4 resp. A-E
InitReichweite = 0;     //Keine Vorladung, erster Ladevorgang im Depot
Kapazitaet = 30;
Laderate = 0.25;

KostenStation = [1, 1, 1, 1, 1];
MaxStationen = [10, 5, 5, 5, 5];

Entfernung =           //Entfernungsmatrix, 0->1: 10km, 0->2: 15km, ...
#[
  0: #[
    1: 10,
  ]#
  0: #[
    2: 15,
  ]#
  0: #[
    4: 15,
  ]#
  0: #[
    3: 15,
  ]#
  1: #[
    0: 10,
  ]#
  ...
]#;

Touren =               //Tourenliste, Fahrzeug ev1 fährt von A nach B, hat dort
                       //50 min Service-Zeit, fährt dann nach C, hat dort 30 min
                       //Service-Zeit und kehrt dann nach A zurück, Fahrzeug ev2 ...
{
  <0 <ev1> 1 120>,
  <1 <ev1> 2 50>,
  <2 <ev1> 3 30>,
  <0 <ev1> 4 0>,
  <0 <ev2> 1 120>,
  <3 <ev2> 2 50>,
  <4 <ev2> 3 50>,
  <0 <ev2> 4 0>,
};

```

Abbildung 9: Beispielhafte Problemistanz für LFRS

Die Darstellung der Lösung in der Entwicklungsumgebung des Optimization Studios zeigt, dass vier Ladestationen benötigt werden, zwei im Knoten A (Depot) und jeweils eine in den Knoten B und D.

```
// solution (optimal) with objective 4
...
AnzStationen = [2 1 0 1 0];
Restreichweite = [0 12.5 15 0 0 12.5 15 0];
Reichweitengewinn = [22.5 12.5 0 0 27.5 12.5 0 0];
Aufladen = [1 1 0 0 1 1 0 0];
Anpassungswert = [7.5 0 0 0 2.5 0 0 0];
...
```

Abbildung 10: Darstellung der Lösung zur beispielhaften Problem Instanz

Die Ergebnisvektoren für Restreichweite, Reichweitengewinn, Aufladen und Anpassungswert zeigen Fahrzeug für Fahrzeug aneinander gereiht die Werte für aufeinanderfolgende Sequenzen an. So hat das erste Fahrzeug (ev1) im Knoten B eine Restreichweite von 12,5 km und im Knoten C eine Restreichweite von 15 km – gerade genug, um nach A zurückkehren zu können. Das erste Fahrzeug lädt im ersten Knoten (im Depot) für einen Reichweitengewinn von 22,5 km und lässt - abzulesen am Anpassungswert - Ladezeit für 7,5 km ungenutzt. Das zweite Fahrzeug erzielt einen Reichweitengewinn von 27,5 km im Depot und verzichtet auf 2,5 km Reichweite. Beide Fahrzeuge haben an ihrer letzten Station, der Rückkehr zu Knoten A, eine Restreichweite von 0 km.

Die erste Zeile in Abbildung 1 zeigt, dass es sich hier eine um eine *optimale* Lösung handelt (vgl. Diskussion zu Lösungsverfahren ab Seite 29). Das IBM ILOG CPLEX Optimization Studio kennt neben *optimal* u.a. die weiteren möglichen Ergebnisklassen *infeasible* (nicht lösbar), *feasible* (Lösung ist gültig, aber nicht unbedingt optimal) und *feasible relaxed* (Lösung unter Aufgabe bestimmter Restriktionen möglich). Für den Fall *feasible relaxed* werden Informationen dazu bereitgestellt, wie bestimmte Restriktionen zu entspannen sind, um eine gültige Lösung erhalten zu können (z.B. Erhöhung der Restreichweite für einzelne Fahrzeuge).

In dieser Arbeit werden im Folgenden ausschließlich optimale Lösungen berücksichtigt.

4.4 ArcGIS Desktop AddIn LARS

Das AddIn *LARS*, die Schlüsselkomponente der vorgestellten Lösungsumgebung, ist in der Sprache C# auf Basis des .net-Frameworks implementiert. Als Entwicklungsumgebung wird Microsoft Visual Studio 10 mit installiertem ESRI ArcObjects SDK genutzt.

Das AddIn ist als Werkzeugleiste *Ladeinfrastrukturplanung* in der ArcGIS Desktop Anwendung ArcMap sichtbar, siehe dazu Abbildung 11.

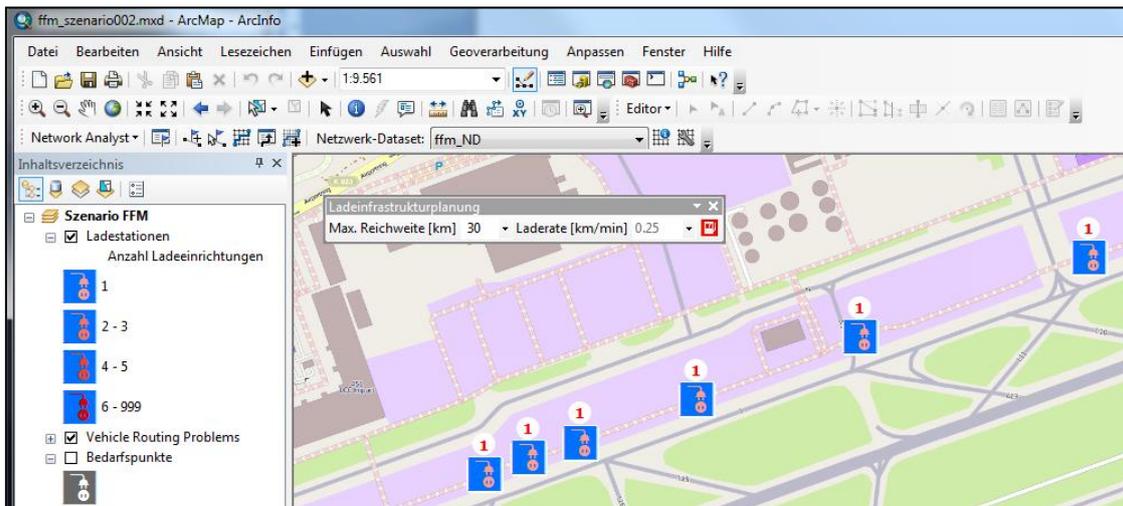


Abbildung 11: Werkzeugleiste des AddIns LARS

Die Werkzeugleiste enthält zwei ComboBoxes zur Eingabe von Maximaler Reichweite und Laderate sowie einen Button zum Start der Lösungssuche.

Das Drücken des Buttons löst eine Methode *OnClick()* aus, die folgende Aktionen durchführt:

1. Prüfen, ob die Network Analyst Extension verfügbar ist.
2. Prüfen, ob gültiges Vehicle Routing Problem (VRP) im Map Document enthalten ist.
3. Lösen des VRP, sofern noch nicht erfolgt.
4. Prüfen, ob die Feature Class Bedarfspunkte vorhanden ist. Erzeugung der Knotenliste aus Bedarfspunkten.
5. Erzeugen der Kantenliste aus interner OD-Matrix des VRP.
6. Erzeugen der Fahrzeugliste aus Routen-Layer des VRP.
7. Erzeugen der Tourenliste aus Aufträge-Layer und Depot-Layer des VRP.

8. Aufrufen der Methode *ExecLFRS()* aus der Klasse LFRS mit Knotenliste, Kantenliste, Fahrzeugliste, Tourenliste, der Kapazität (maximale Reichweite) und der Laderate.
9. Speichern der Ergebnisse (Anzahl der nötigen Ladestationen) in der Feature Class Bedarfspunkte und Aktualisierung der Kartenanzeige.

Die Abbildung 12 stellt die wesentlichen Klassen, Methoden und Datenstrukturen des AddIns zusammen.

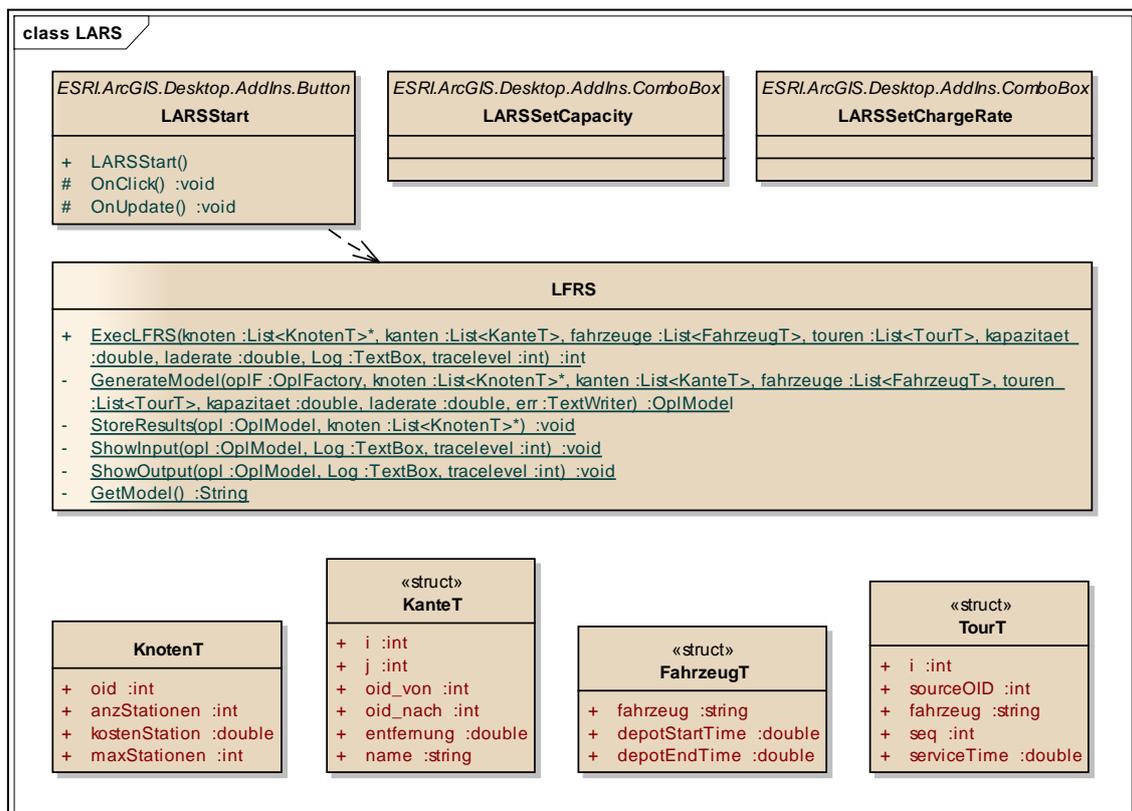


Abbildung 12: Wichtige Klassen und Methoden des LARS AddIns

Die Klasse *LFRS* enthält Klassenmethoden zur Erzeugung und Lösung des OPL/CPLEX-Modells. Das OPL-Modell (siehe Abbildung 8, Seite 53) wird in der Methode *GetModel()* als Zeichenkette zusammengeführt, es ist somit in den Quellcode integriert. Die Methode *GenerateModel()* erzeugt eine Instanz *opl* der Klasse *OplModel*, für die über den Aufruf des CPLEX-Solvers (*opl.Cplex.Solve()*) eine Lösung berechnet wird. Die Methode *StoreResults()* speichert das Ergebnis in der Knotenliste.

Die Klasse *LFRS* kapselt somit alle Model- und Solver-spezifischen Abläufe, während die Klasse *LARSStart* die Kommunikation mit dem Kartendokument und dem VRP so-

wie die Aufbereitung der Parameter für den Aufruf von *ExecLFRS()* abbildet. Eine Erweiterung durch weitere Modelle und/oder Solver ist somit leicht möglich.

Die Klasse *KnotenT* bildet die Bedarfspunkte mit der ermittelten Anzahl von nötigen Ladestationen, den Kosten und der maximal möglichen Anzahl von Ladestationen ab. Die Struktur *KanteT* beschreibt die Wegstrecken mit Von- und Nach-Bedarfspunkten, der Entfernung zwischen den beiden Bedarfspunkten, die die Wegstrecke verbindet und einer Bezeichnung. Die Struktur *FahrzeugT* enthält für die Fahrzeuge eine Bezeichnung sowie die Rüstzeiten im Depot vor und nach einer Tour. Die Struktur *TourT* schließlich beschreibt die Elemente der Touren mit jeweils einem Bedarfspunkt, einem Fahrzeug und einer Sequenznummer, die in Reihenfolge der besuchten Bedarfspunkte je Fahrzeug aufsteigend ist. Die Sequenznummer für den Tourstart eines Fahrzeugs im Depot ist 0.

4.5 Struktur und Inhalt der Geodatabase

Die ArcGIS File Geodatabase enthält die Elemente für das routingfähige Wegenetz wie Straßen, Abbiegevorschriften und Barrieren sowie die Bedarfspunkte. Diese in Abbildung 13 gezeigten Elemente sind als Feature Classes Teil eines Network Datasets, das Regeln für Konnektivität und Kantenübergänge sowie Kosteninformationen und Einschränkungen abbildet.

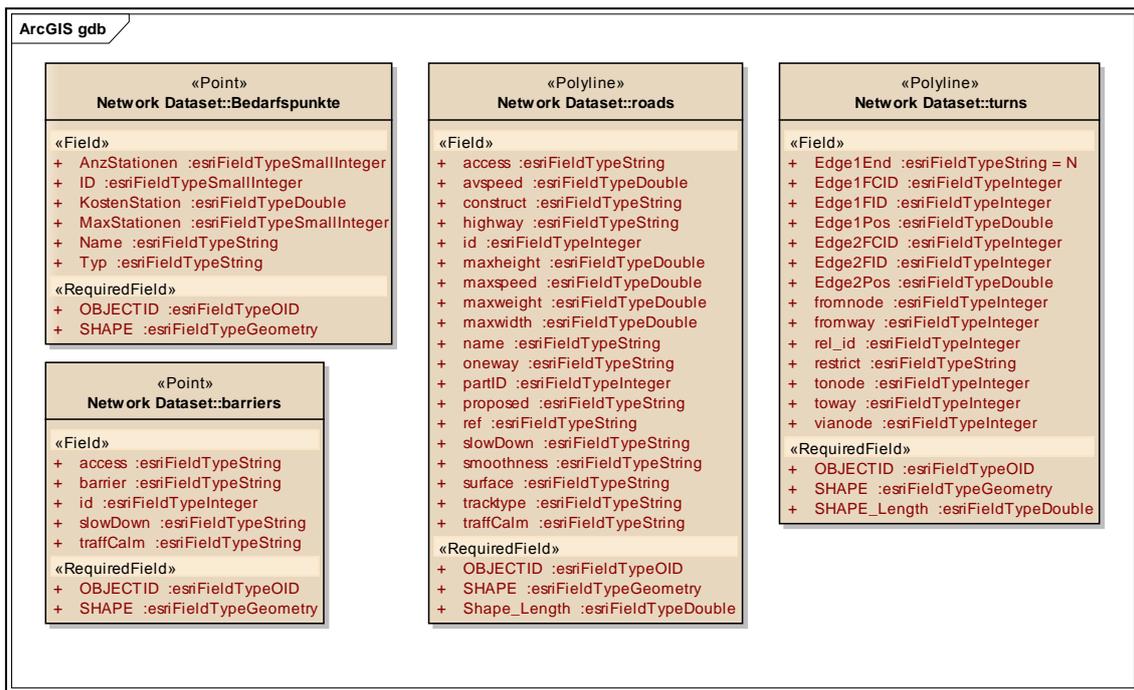


Abbildung 13: ArcGIS File Geodatabase

Die Bedarfspunkte sind spezifisch für ein betrachtetes Szenario. In dieser Feature Class sind neben beschreibenden Attributen insbesondere die Informationen zur maximalen Anzahl und zu den Kosten der Einrichtung von Ladestationen sowie die im letzten Lösungslauf ermittelte Anzahl von nötigen Ladestationen enthalten. Die Bedarfspunkte sind als erreichbare Knoten im Network Dataset eingebaut.

Die Feature Class *roads* enthält die einzelnen Strecken des Wegenetzes mit zahlreichen Attributen zur Beschaffenheit, zur Befahrbarkeit, zu Einschränkungen und zur anzunehmenden Durchschnittsgeschwindigkeit, die neben der Streckenlänge als wesentliches Kostenattribut im Network Dataset referenziert ist.

Die Feature Class *turns* beschreibt die möglichen Abbiegevorgänge an den Kreuzungspunkten von Strecken, während die Feature Class *barriers* punktförmige Hindernisse enthält, die entweder nicht passierbar sind oder die Geschwindigkeit verringern.

Die Feature Classes *roads*, *turns* und *barriers* sowie das Network Dataset können mit Hilfe des frei verfügbaren Werkzeugs *OSM2NetworkDataset* (vgl. [PETERS 2010]) aus einem OpenStreetMap-Datenauszug des Untersuchungsgebietes automatisch erzeugt werden. Ebenso ist der Erwerb von einem kommerziellen Anbieter wie z.B. ESRI möglich.

4.6 Generisches Vorgehensmodell

Dieser Abschnitt stellt das generelle Vorgehen für die Standortoptimierung mit der beschriebenen Lösungsumgebung unabhängig vom konkreten Szenario vor. Dabei ist eine betriebsfähige Umgebung mit ArcGIS Desktop, der Network Analyst Extension sowie dem AddIn LARS und dem Werkzeug *OSM2NetworkDataset* vorausgesetzt. Ebenso ist das IBM ILOG CPLEX Optimization Studio erforderlich.

Das dargestellte Vorgehensmodell wird im nächsten Kapitel auf ein konkretes Szenario angewendet, dort sind die einzelnen Schritte dann weiter detailliert beschrieben.

Der erste Schritt ist die Festlegung des Untersuchungsgebietes und des betrachteten Wegenetzes. Sofern keine routingfähigen Daten zum betrachteten Gebiet vorliegen, wird zunächst ein Ausschnitt aus OpenStreetMap erzeugt und nach Anpassung der Parameterdatei mit dem Werkzeug *OSM2NetworkDataset* in ein Network Dataset umgeformt. Die erforderlichen Anpassungen können sich zum Beispiel auf Restriktionen für Fahrzeugtypen, Abbiegevorschriften oder angenommene Geschwindigkeiten beziehen.

Für die Anzeige von Hintergrundkarten und zur Visualisierung der Ergebnisse wird ein ESRI ArcGIS Kartendokument angelegt. Die Bedarfspunkte sind als Feature Class zu erfassen und zusätzlich in das Network Dataset aufzunehmen. Fahrzeuge und Aufträge werden innerhalb der beiden Layer Routen und Aufträge eines Vehicle Routing Problems erfasst und gepflegt.

Im Anschluss an die Lösung des VRPs erfolgen die Berechnung der nötigen Ladestationen und deren Anzeige in der Karte durch das AddIn LARS.

Die anschließende Interpretation der Ergebnisse wird häufig zu Iterationen mit geänderten Parametern für Reichweite und Laderate führen oder aber auch zu Varianten, die sich auf das VRP auswirken. Dies können zum Beispiel die Aufnahme weiterer Fahrzeuge oder Änderungen an den Aufträgen sein.

Die Abbildung 14 zeigt das generische Vorgehensmodell als Aktivitätendiagramm.

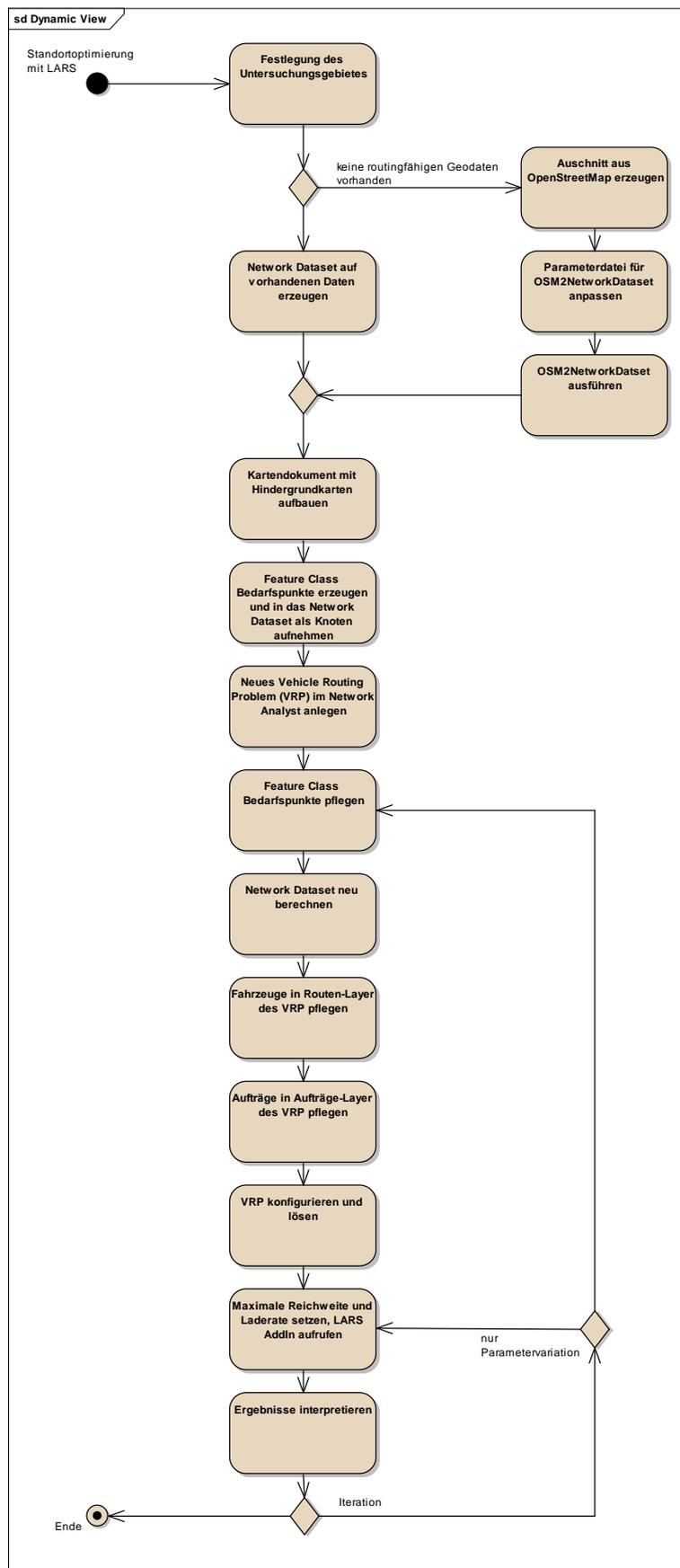


Abbildung 14: Generisches Vorgehensmodell

4.7 Kriterien zur Verifikation der Ergebnisse

Um die Korrektheit einer optimalen Standortsuche mit LARS und dem integrierten Modell LFRS festzustellen, ist zu beweisen, dass es *keine* kostengünstigere Positionierung von Ladestationen gibt, die die Bedarfsstruktur des untersuchten Szenarios unterstützt. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf einen derartigen formalen Korrektheitsbeweis verzichtet.

Die nachfolgend in Tabelle 1 erläuterten notwendigen Kriterien für eine korrekte Lösung sollen der Plausibilisierung und Verifikation der Ergebnisse dienen.

Kriterium	Beschreibung	Prüfung
K1	Die Summe der Reichweitenzugewinne durch Ladevorgänge muss größer oder gleich der Summe der Längen aller Touren sein.	Vergleich der Gesamtsumme des Feldes <i>TotalDistance</i> aus der Routen-Tabelle des VRP mit der Kontrollausgabe <i>Summe der Reichweitenzugewinne</i> aus dem Log-Fenster des LARS.
K1*	Die Summe der Reichweitenzugewinne durch Ladevorgänge muss gleich der Summe der Längen aller Touren sein, wenn im Modell für das Depot explizit gefordert wird Restreichweite = 0.	Prüfung analog zu K1, allerdings mit geändertem LFRS-Modell, siehe Abbildung 15.
K2	Liegt die Reichweite der Fahrzeuge unterhalb der Länge der längsten Etappe, so kann es keine gültige Lösung geben.	Vergleich der eingegebenen Reichweite mit dem maximalen Wert des Feldes <i>FromPrevDistance</i> aus der Auftrags-tabelle des VRP.
K3	Ist das Produkt aus Laderate und der Rüstzeit im Depot kleiner als die größte Länge der jeweils ersten Etappe aller Touren, so kann es keine gültige Lösung geben.	Vergleich des Produkts aus eingegebener Laderate und Rüstzeit mit dem maximalen Wert <i>FromPrevDistance</i> für <i>Sequence=2</i> aus der Auftrags-tabelle des VRP.
K4	Ist das Produkt aus Laderate und der Rüstzeit im Depot größer als die Länge der längsten Tour, so entspricht die Anzahl der Ladestationen der Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge und es gibt keine Ladestationen außerhalb des Depots.	Vergleich des Produkts aus eingegebener Laderate und Rüstzeit mit dem maximalen Wert <i>TotalDistance</i> aus der Routentabelle des VRP.
K5	Die Kosten und die Anzahl der Ladestationen sind bei steigender Laderate monoton fallend.	Betrachtung einer Messreihe unter Variation der Laderate.
K6	Die Kosten und die Anzahl der Ladestationen sind bei steigender Reichweite der Fahrzeuge monoton fallend.	Betrachtung einer Messreihe unter Variation der Reichweite.

Tabelle 1: Notwendige Plausibilitätskriterien

```
ct2:
    if (r.s == 1)
        Restreichweite[r] == InitReichweite;
    else
        if (r.i == 0)
            0 == Restreichweite[prev(Touren,r)] + Reichweitenge-
winn[prev(Touren,r)] - (Entfernung[prev(Touren,r).i][r.i]);
        else
            Restreichweite[r] == Restreichweite[prev(Touren,r)] +
Reichweitengewinn[prev(Touren,r)] - (Entfernung[prev(Touren,r).i][r.i]);
```

Abbildung 15: Modelländerung für zusätzliche Plausibilitätskontrolle des LFRS (K1*)

Die genannten Kriterien wurden für alle bei der Erstellung dieser Arbeit durchgeführten Lösungssuchen und Messreihen erfolgreich geprüft. Das folgende Kapitel nimmt bei der Anwendung im Szenario eines Großflughafens darauf an einigen Stellen Bezug.

5 Anwendung im Szenario Großflughafen

Dieses Kapitel zeigt den Einsatz der vorangehend beschriebenen integrierten Lösung aus Eigenentwicklungen und Produktkomponenten an einem konkreten Anwendungsbeispiel.

5.1 Motivation und Überblick

Das *Cooperative Computing & Communication Laboratory (C-LAB)* in Paderborn ist ein gemeinsamer Forschungs- und Entwicklungsbereich der Universität Paderborn und der Atos IT Solutions and Services GmbH (vgl. [C-LAB 2012]). Das C-LAB befasst sich mit Projekten im Umfeld der Analyse und Simulation von Geschäftsszenarien der Elektromobilität, als Beispiel ist hier das Projekt EMSS (Electric Mobility Simulation Suite) zu nennen (vgl. [C-LAB 2011, S. 34 f.]).

In einem künftigen Projekt⁴ mit einem Industriepartner, der Hersteller von Ladestationen und Infrastrukturen ist, sollen für einen Großflughafen umfangreiche Beratungsleistungen im Umfeld der Umstellung von Fahrzeugflotten der Bodendienste auf Elektroantrieb erbracht werden. Die in dieser Arbeit vorgestellte Lösung kann dazu einen wertvollen Beitrag leisten, zumal Fragestellungen der Standortanalyse und -optimierung von Ladestationen aus den bisherigen Projekten des C-LAB (z.B. EMSS) noch nicht hinreichend beantwortet werden können.

Die grundlegende Motivation des Endkunden (also des Großflughafens) ist die Chance, durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen CO₂-neutral wachsen zu können. Kostenaspekte spielen eine weitere wesentliche Rolle, da mit einer weiteren Verteuerung fossiler Energieträger zu rechnen ist. Dem gegenüber stehen die Kosten für Ladeinfrastruktur und Fahrzeuge.

Das folgende fiktive Szenario untersucht am Beispiel des deutschen Großflughafens Frankfurt am Main, wie die Lösung aus dieser Arbeit zur Minimierung der Kosten für Ladestationen eingesetzt werden kann. Es werden dabei Fahrzeuge betrachtet, die zur Betankung der Flugzeuge an Terminals, im Vorfeld und an weiteren Bedarfspunkten eingesetzt werden. Die Ergebnisse des Szenarios und das Lösungsverfahren selbst sollen dem Industriepartner im Vorfeld des künftigen Projekts vorgestellt und in Akquisitongesprächen mit dem Endkunden genutzt werden.

⁴ Zum Zeitpunkt der Abgabe der Thesis dürfen Endkunde und Industriepartner nicht benannt werden.

5.2 Geodaten

Der Großflughafen stellt bisher keine nutzbaren Geodaten zum Wegenetz und den Bedarfspunkten bereit. Aus diesem Grund kommen an dieser Stelle freie Geodaten aus OpenStreetMap zum Einsatz.

Zunächst erfolgt der Ausschnitt eines Bereichs um den Flughafen Frankfurt am Main mit Hilfe der Export-Funktion auf der Seite <http://www.openstreetmap.org/>.

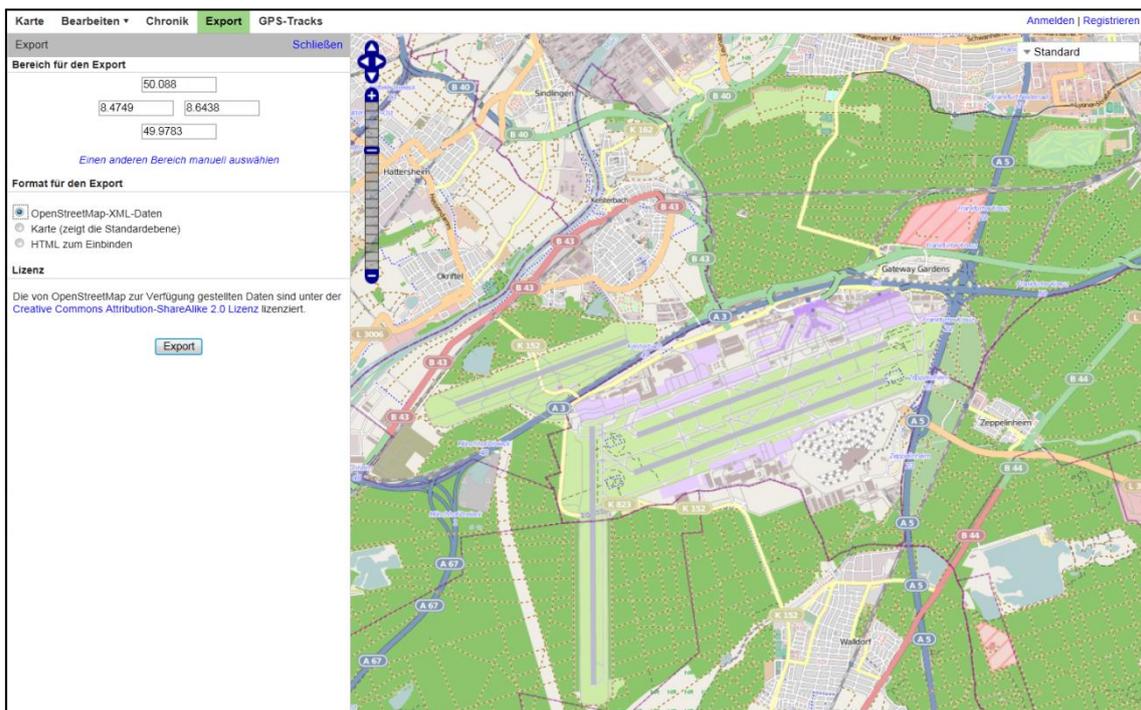


Abbildung 16: Export aus OpenStreetMap (Flughafen FFM)

Die exportierte .osm-Datei wird anschließend mit dem frei verfügbaren Werkzeug *OSM2NetworkDataset* (vgl. [PETERS 2012]) in ein ESRI ArcGIS Network Dataset umgeformt.

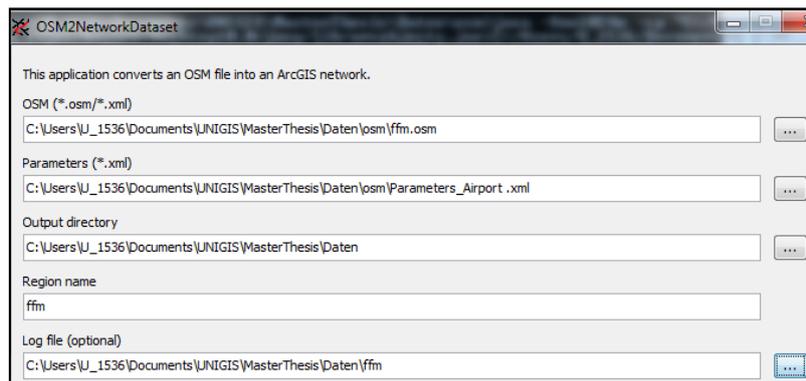


Abbildung 17: Umformung in ArcGIS Network Dataset

Für die Erstellung des Network Datasets wird die Parameterdatei *Parameters_Airport.xml* verwendet, die aus der vorhandenen Datei *Parameters_Motorcar_v1.1.xml* abgeleitet ist. Die Tabelle 2 zeigt die dabei vorgenommenen Anpassungen.

Die Parameterdatei beschreibt das Profil eines bestimmten Transportmittels. Die hier genutzte verallgemeinerte Parametrisierung ‚Airport‘ ist für das beschriebene fiktive Szenario ausreichend. Für ein reales Projekt ist eine Verfeinerung hinsichtlich der jeweils betrachteten Fahrzeuge erforderlich.

Für weitere Details zum Aufbau und Inhalt der Parameterdatei sei auf [PETERS 2010, S. 43 f.] verwiesen.

Parameter	Key	Value	Bemerkungen
<access_barrier_restrictions>	sally_port	yes	Standardwerte für Beschränkungen an bestimmten punkthaften Barrieren (z.B. Tordurchfahrten, Zufahrten, Ausfahrten, Gatter, Schranken) werden auf ‚befahrbar‘ gesetzt. Vorhandene Werte an Barrieren ungleich ‚yes‘/‚no‘ werden als Verkehrsarten wie nachfolgend beschrieben interpretiert.
	entrance	yes	
	exit	yes	
	gate	yes	
	gate;cattle_grid	yes	
	lift_gate	yes	
	gate:lift	yes	
	bar	yes	
	swing_gate	yes	
<access_barrier_restrictions_interpretation>	destination	yes	Für die Verkehrsarten <i>Anlieger</i> , <i>Anlieferung</i> , <i>privat</i> und <i>unbekannt</i> werden Barrieren als passierbar interpretiert.
	delivery	yes	
	private	yes	
	unknown	yes	
<access_highway_restrictions>	driveway	yes	Standard-Beschränkungen für Wegearten werden auf ‚befahrbar‘ gesetzt (Gassen, Busspuren, Bushaltestellen, Fußgängerüberwege).
	bus_guideway	yes	
	bus_stop	yes	
	crossing	yes	
<access_highway_restrictions_interpretation>	destination	yes	Für die Verkehrsarten <i>Anlieger</i> , <i>Anlieferung</i> und <i>privat</i> werden Wege als passierbar interpretiert.
	delivery	yes	
	private	yes	
<avspeed_highway_implications>	motorway	80	Einstellungen geringerer geschätzter Durchschnittsgeschwindigkeiten auf bestimmten Wegearten (Autobahnen, Kraftfahrstraßen, Bundesstraßen, Landstraßen, Kreisstraßen, Wohngebiete, Gassen, Busspuren und Bushaltestellen) für die am Airport eingesetzten Fahrzeuge.
	motorway_link	70	
	motorway_junction	60	
	trunk	70	
	trunk_link	50	
	primary	50	
	primary_link	50	
	secondary	50	
	tertiary	50	
	residential	30	
	driveway	30	
	bus_guideway	40	
	bus_stop	20	

Tabelle 2: Anpassungen in der Datei Parameters_Airport.xml

Detaillierte Information zu den Keys sind auf [OSM 2012 (2)] verfügbar.

Das entstehende Network Dataset *ffm_ND* enthält Kanten, Knoten, Abbiegeregeln und Barrieren sowie weitere Restriktionen. Es wird um die Bedarfspunkte des Szenarios ergänzt, wie im nächsten Abschnitt beschrieben.

5.3 Bedarfsstruktur und Tourenplanung

5.3.1 Bedarfspunkte

Die Bedarfspunkte im vorgestellten Szenario befinden sich an den Parkpositionen der Flugzeuge an den Terminals, an Positionen im Vorfeld, in Luftfracht-Bereichen und weiteren Positionen der Werkstattbereiche sowie im Bereich der Allgemeinen Luftfahrt (General Aviation). An den Bedarfspunkten erfolgt die Betankung der Flugzeuge. Die Zeit während der Betankung ist als potentielle Ladezeit für Elektrofahrzeuge zu betrachten. Die Abbildung 18 zeigt die 123 Bedarfspunkte des Szenarios zunächst in der Übersicht. Die Symbolisierung der Bedarfspunkte legt bereits nahe, dass es sich um potentielle Standorte für Ladestationen handelt.



Abbildung 18: Bedarfspunkte in der Übersicht

Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen die Bedarfspunkte an den Terminals und den vorgelagerten Vorfeldern. In Abbildung 20 ist zudem das Depot der zentralen Tankdienste im nordöstlichen Bereich zu sehen, hier beginnen und enden alle Touren der Tankfahrzeuge.



Abbildung 19: Bedarfspunkte Terminal 1 und Vorfelder



Abbildung 20: Bedarfspunkte Terminal 2 und Vorfelder

Die Bedarfpunkte in den Luftfrachtbereichen (CargoCity) Nord und Süd, den Wartungsbereichen und an den nahegelegenen Vorfeldpositionen sowie am General Aviation Terminal (GAT) sind in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt.



Abbildung 21: Bedarfspunkte Cargo City und Wartung Nord sowie Vorfelder

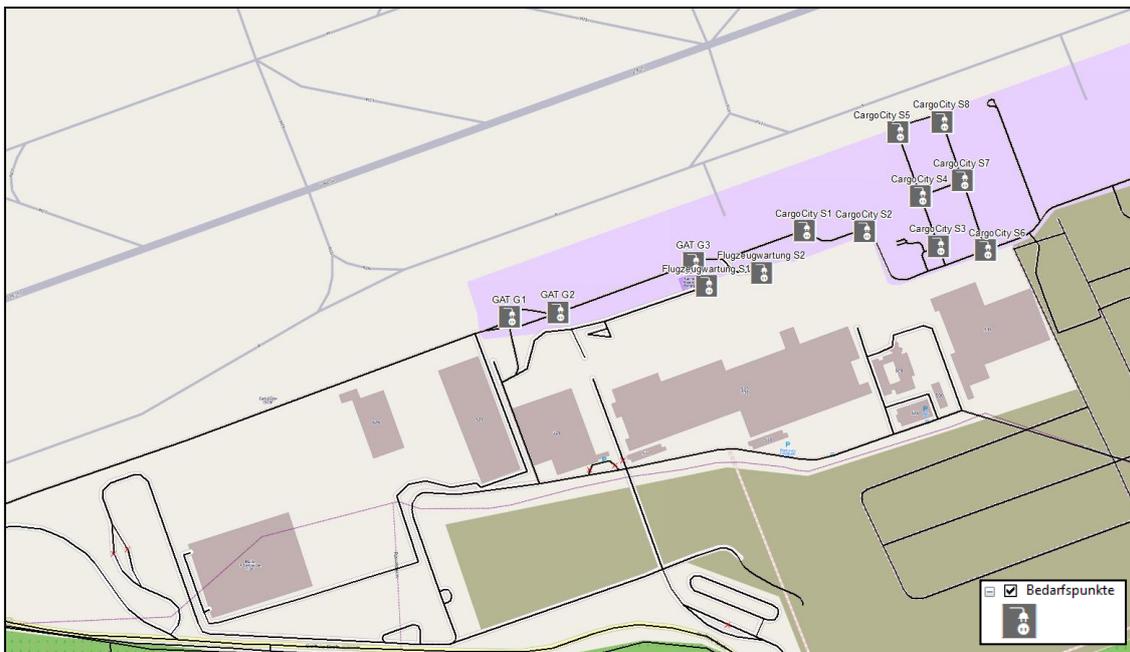


Abbildung 22: Bedarfspunkte Cargo City und Wartung Süd, GAT

Die folgende Tabelle 3 zeigt einen Ausschnitt der Attributtabelle der Feature Class für die Bedarfspunkte. Die relevanten Sachdaten der einzelnen Bedarfspunkte sind neben der Bezeichnung (Name) die maximale Anzahl der möglichen Ladestationen (MaxStationen) und die Kosten einer Ladestation (KostenStation).

OBJECTID *	Typ	Name	MaxStationen	KostenStation
1	DT	Depot Tankdienste	50	1
2	T	Terminal 2 E4	10	2
3	T	Terminal 2 D8	10	2
4	T	Terminal 1 C8	10	2
5	T	Terminal 1 B2	10	2
6	T	Terminal 1 B22	10	2
7	T	Terminal 1 A17	10	2
10	T	Terminal 1 A18	10	2
11	T	Terminal 1 A38	10	2
12	T	CargoCity N10	10	2
13	T	CargoCity N1	10	2
14	T	Vorfeld V174	10	1
16	T	Vorfeld V164	10	1
18	T	Vorfeld V124	10	1
19	T	Vorfeld V106	10	1
21	T	GAT G1	10	2
22	T	CargoCity S1	10	2
23	T	Flugzeugwartung S1	10	2
24	T	Flugzeugwartung N1	10	2
25	T	Vorfeld V102	10	1
26	T	Vorfeld V100	10	1
27	T	Vorfeld V98	10	1

Tabelle 3: Attributtabelle Bedarfspunkte (Ausschnitt)

Nach der Einpflege der Bedarfspunkte ist die Feature Class dem Network Dataset als Quelle vom Typ Knoten-Feature hinzuzufügen (siehe Abbildung 23).

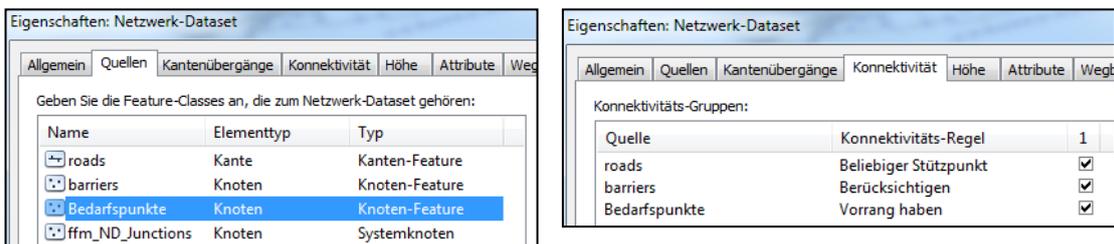


Abbildung 23: Aufnahme der Bedarfspunkte in das Network Dataset

5.3.2 Fahrzeuge

Die Treibstoffversorgung an Großflughäfen erfolgt häufig über ein Unterflursystem und Hydranten, die sich in der Nähe der Parkpositionen der Flugzeuge befinden (siehe hierzu beispielsweise [FRAPORT 2007, S. 48 f.]).

Sogenannte Dispenser-Fahrzeuge werden eingesetzt, um den Treibstoff aus den Hydranten in die Flugzeuge zu pumpen. Die Dispenser bieten eine Förderleistung im Bereich von 2000-4000 l/min bei einem Gewicht von 4-6 t. Ein Hersteller solcher Fahrzeuge ist die Firma Esterer [ESTERER 2012], die Abbildung 24 zeigt das Modell FHW.



Abbildung 24: Hydrant Dispenser Esterer Model FHW

Die Firma Liquip International stellt heute bereits eine elektrisch betriebene Version ihres Dispensers 3850LPM her (Abbildung 25).



Abbildung 25: Hydrant Dispenser Liquip 3850LPM electric chassis

Im Folgenden werden für das Szenario Großflughafen derartige Dispenser betrachtet.

Die Fahrzeuge werden in den Layer *Routen* eines Vehicle Routing Problems (VRP) im Network Analyst eingepflegt. Dabei sind Name, Start- und Enddepot, die Rüstzeit vor Beginn der Tour (StartDepotServiceTime), die Kosten pro Zeiteinheit, die maximale Anzahl von Aufträgen und die maximale Einsatzzeit einzutragen. Wie Abbildung 26 zeigt, sind 50 Dispenser-Fahrzeuge für das Szenario vorgesehen.

Routen							
ObjectID	Name	StartDepotName	EndDepotName	StartDepotServiceTime	CostPerUnitTime	MaxOrderCount	MaxTotalTime
1241	Dispenser 1	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1242	Dispenser 2	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1243	Dispenser 3	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1244	Dispenser 4	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1245	Dispenser 5	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1246	Dispenser 6	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1247	Dispenser 7	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1248	Dispenser 8	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1249	Dispenser 9	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1250	Dispenser 10	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1251	Dispenser 11	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1252	Dispenser 12	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1253	Dispenser 13	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1254	Dispenser 14	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1255	Dispenser 15	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1256	Dispenser 16	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1257	Dispenser 17	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1258	Dispenser 18	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1259	Dispenser 19	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1260	Dispenser 20	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1261	Dispenser 21	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1262	Dispenser 22	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1263	Dispenser 23	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1264	Dispenser 24	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1265	Dispenser 25	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1266	Dispenser 26	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1267	Dispenser 27	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1268	Dispenser 28	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1269	Dispenser 29	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1270	Dispenser 30	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1271	Dispenser 31	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1272	Dispenser 32	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1273	Dispenser 33	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1274	Dispenser 34	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1275	Dispenser 35	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1276	Dispenser 36	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1277	Dispenser 37	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1278	Dispenser 38	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1279	Dispenser 39	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1280	Dispenser 40	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1281	Dispenser 41	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1282	Dispenser 42	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1283	Dispenser 43	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1284	Dispenser 44	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1285	Dispenser 45	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1286	Dispenser 46	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1287	Dispenser 47	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1288	Dispenser 48	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1289	Dispenser 49	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540
1290	Dispenser 50	Depot Tankdienste	Depot Tankdienste	60	1	30	540

Abbildung 26: Fahrzeuge als Routen im VRP

Die Rüstzeit von jeweils 60 Minuten kann für einen initialen Ladevorgang genutzt werden. Das Szenario geht von einer Periode bzw. Schichtdauer von insgesamt 9 Stunden inklusive der Rüstzeit aus.

Der Lösungsvorgang des VRP ordnet den Fahrzeugen später die Touren (Routen) als Sequenz der besuchten Bedarfspunkte zu.

5.3.3 Aufträge

Das vorgestellte Szenario geht von etwa 60 Flugbewegungen (= Starts und Landungen) pro Stunde und einer resultierenden Auftragsfrequenz von etwa 30 Betankungsvorgängen je Stunde aus. Dieser Wert liegt oberhalb der aus dem Kurzprofil der Fraport AG zu entnehmenden 1250 Flugbewegungen je Tag [FRAPORT 2012].

Die Aufträge werden in den Layer *Aufträge* des VRPs im Network Analyst eingepflegt, insgesamt sind es 311 Aufträge. Die Abbildung 27 zeigt einen Ausschnitt aus der Auftrags-tabelle.

Aufträge							
	Name	ServiceTime	TimeWindowStart1	TimeWindowEnd1	SpecialtyNames	SourceID	SourceOID
▶	Terminal 1 B2	40	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	5
	Terminal 1 A18	30	08:30:00	09:00:00	Dispenser	Bedarfspunkte	10
	CargoCity N1	40	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	13
	Vorfeld V174	15	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	14
	Vorfeld V164	20	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	16
	GAT G1	15	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	21
	CargoCity S1	45	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	22
	Vorfeld V92	30	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	30
	Terminal 2 D12	30	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	51
	Terminal 1 C11	45	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	52
	Terminal 1 B26	30	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	66
	Terminal 1 A23	30	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	75
	Terminal 1 A20	30	08:30:00	09:00:00	Dispenser	Bedarfspunkte	87
	Vorfeld V148	30	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	88
	Vorfeld V158	20	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	93
	Vorfeld V167	15	08:30:00	09:00:00	Dispenser	Bedarfspunkte	98
	Flugzeugwartung N4	45	08:30:00	09:00:00	Dispenser	Bedarfspunkte	106
	CargoCity N9	45	08:30:00	09:00:00	Dispenser	Bedarfspunkte	114
	CargoCity N7	45	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	117
	CargoCity N2	30	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	120
	CargoCity S4	40	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	127
	Flugzeugwartung S2	50	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	133
	Terminal 1 A18-2	30	08:30:00	09:00:00	Dispenser	Bedarfspunkte	10
	CargoCity N1-2	40	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	13
	Vorfeld V124-2	20	08:30:00	09:00:00	Dispenser	Bedarfspunkte	18
	GAT G1-2	15	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	21
	Flugzeugwartung S1-2	30	08:30:00	09:00:00	Dispenser	Bedarfspunkte	23
	Flugzeugwartung N4-2	45	08:30:00	09:00:00	Dispenser	Bedarfspunkte	106
	GAT G1-3	15	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	21
	CargoCity S1-3	45	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	22
	Terminal 1 B2-3	40	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	5
	Terminal 1 A18-3	30	08:30:00	09:30:00	Dispenser	Bedarfspunkte	10
	Terminal 1 C11-3	45	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	52
	Terminal 1 B26-3	30	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	66
	Terminal 1 A23-3	30	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	75
	CargoCity N2-3	30	08:30:00	08:45:00	Dispenser	Bedarfspunkte	120

⏪ ⏩ 1 ⏪ ⏩ (0 aus 311 Ausgewählte)

Abbildung 27: Aufträge im VRP (Ausschnitt)

Die zur Auftragsbefreiung erforderliche Zeit (*ServiceTime*) ist im Bereich von 15 bis 60 Minuten gestreut, um den unterschiedlichen Kapazitäten und Bedarfen der zu betankenden Flugzeuge Rechnung zu tragen. Bei einer angenommenen Förderleistung von etwa 4000 l/min besteht für die Vollbetankung eines Airbus A340-500 mit 215.000 l Kapazität (vgl. [AIRBUS 2012]) ein Zeitbedarf von etwa 54 Minuten.

Die Zeitfenster der Aufträge (Zeitbereiche, in denen mit der Betankung begonnen werden muss) sind im Bereich von 15 bis 45 Minuten ausgewählt und über die gesamte Periode verteilt. Dabei sind vereinzelt auch zeitlich parallele Aufträge am gleichen Bedarfspunkt enthalten, um nachzubilden, dass möglicherweise mehrere Dispenser gleichzeitig ein Flugzeug betanken sollen.

5.3.4 Touren

Im Anschluss an das Laden der Bedarfspunkte, Fahrzeuge und Aufträge erfolgt die Parametrisierung des VRP. Dabei wird die Minimierung der Gesamtfahrzeit aller zur Auftragsbefriedigung benötigten Fahrzeuge als Optimierungsziel gewählt. Die aus den OpenStreetMap-Daten übertragenen Restriktionen (Abbiegeverbote, Einbahnstraßen, etc.) werden dabei neben den Durchschnittsgeschwindigkeiten ebenfalls berücksichtigt.

Die anschließende Lösung des VRP ordnet den Fahrzeugen die Touren zu. Die Abbildung 28 zeigt, dass 46 der 50 möglichen Fahrzeuge in die Planung einbezogen wurden, die Dispenser 42, 48, 49 und 50 sind in der gefundenen Lösung nicht erforderlich.

Routen							
Name	TotalDistance	StartDepotServiceTime	MaxTotalTime	SpecialtyNames	OrderCount	TotalTime	TotalOrderServiceTime
Dispenser 1	2455,357236	60	540	Dispenser	5	194,910714	130
Dispenser 2	8342,641428	60	540	Dispenser	7	241,685283	165
Dispenser 3	23603,1269	60	540	Dispenser	15	519,194097	395
Dispenser 4	15322,078423	60	540	Dispenser	8	538,016189	245
Dispenser 5	9738,264628	60	540	Dispenser	6	249,476529	170
Dispenser 6	3524,705216	60	540	Dispenser	4	202,04941	135
Dispenser 7	19035,858589	60	540	Dispenser	12	535,287235	415
Dispenser 8	28501,047067	60	540	Dispenser	16	538,823621	420
Dispenser 9	21711,823539	60	540	Dispenser	13	534,286436	415
Dispenser 10	18645,589855	60	540	Dispenser	7	253,643992	160
Dispenser 11	19783,131057	60	540	Dispenser	11	538,906423	390
Dispenser 12	19358,589826	60	540	Dispenser	6	240,268667	145
Dispenser 13	21761,011726	60	540	Dispenser	12	538,832247	415
Dispenser 14	26728,280283	60	540	Dispenser	12	535,071491	405
Dispenser 15	14414,428672	60	540	Dispenser	14	526,301364	425
Dispenser 16	22587,585415	60	540	Dispenser	13	530,03859	390
Dispenser 17	17024,837166	60	540	Dispenser	13	537,709794	425
Dispenser 18	9151,900482	60	540	Dispenser	4	198,303801	120
Dispenser 19	34196,184321	60	540	Dispenser	12	487,712377	340
Dispenser 20	11912,376052	60	540	Dispenser	5	240,963411	160
Dispenser 21	26373,275028	60	540	Dispenser	11	508,627625	365
Dispenser 22	14146,143412	60	540	Dispenser	4	202,640637	120
Dispenser 23	8552,46309	60	540	Dispenser	5	244,584558	165
Dispenser 24	12608,659053	60	540	Dispenser	4	221,612196	135
Dispenser 25	2403,968695	60	540	Dispenser	3	169,807937	105
Dispenser 26	10590,010967	60	540	Dispenser	2	146,180022	65
Dispenser 27	12794,253044	60	540	Dispenser	5	242,727165	160
Dispenser 28	12546,890319	60	540	Dispenser	4	232,232439	150
Dispenser 29	30102,681163	60	540	Dispenser	11	525,50133	405
Dispenser 30	22076,037298	60	540	Dispenser	10	536,105744	370
Dispenser 31	9924,172133	60	540	Dispenser	7	516,13374	250
Dispenser 32	9389,455369	60	540	Dispenser	3	193,778911	115
Dispenser 33	10071,135008	60	540	Dispenser	3	220,14227	140
Dispenser 34	8061,473027	60	540	Dispenser	5	531,196861	240
Dispenser 35	10379,686589	60	540	Dispenser	3	233,239005	150
Dispenser 36	11084,059596	60	540	Dispenser	3	229,306778	150
Dispenser 37	3074,134615	60	540	Dispenser	2	171,148269	105
Dispenser 38	4220,821561	60	540	Dispenser	3	188,441643	120
Dispenser 39	6784,974746	60	540	Dispenser	4	228,569949	155
Dispenser 40	3074,134615	60	540	Dispenser	2	171,148269	105
Dispenser 41	9583,216867	60	540	Dispenser	1	124,166434	45
Dispenser 42	<Null>	60	540	Dispenser	<Null>	<Null>	<Null>
Dispenser 43	13757,922429	60	540	Dispenser	5	523,804706	200
Dispenser 44	10082,468294	60	540	Dispenser	1	130,164937	50
Dispenser 45	6093,188112	60	540	Dispenser	6	530,137458	250
Dispenser 46	13695,255567	60	540	Dispenser	5	525,976997	210
Dispenser 47	5571,704555	60	540	Dispenser	4	206,143409	135
Dispenser 48	<Null>	60	540	Dispenser	<Null>	<Null>	<Null>
Dispenser 49	<Null>	60	540	Dispenser	<Null>	<Null>	<Null>
Dispenser 50	<Null>	60	540	Dispenser	<Null>	<Null>	<Null>

Abbildung 28: Lösung des VRP: Touren

Weitere wesentliche Ergebnisse je Fahrzeug sind die zurückgelegte Gesamtentfernung (TotalDistance), die gesamte Einsatzzeit (TotalTime) sowie die gesamte zur Auftrags-

füllung benötigte Zeit (TotalOrderServiceTime), die die gesamte potentielle Ladezeit einer Tour darstellt.

In der folgenden Abbildung 29 ist die Tour des Fahrzeugs *Dispenser 2* zur Verdeutlichung in Form einer Wegbeschreibung dargestellt. Zu erkennen sind die besuchten Bedarfspunkte und die einzelnen Servicezeiten.

[-] Route: Dispenser 2		8342,7 m	4 Stunde(n) 2 Minute(n)
0 m	Start bei: Depot Tankdienste Servicezeit: 1 Std		1 Std
0 m	Folgen Sie dem Strassenverlauf in westlicher Richtung	1169,9 m	2 min
1169,9 m	Biegen Sie ab nach links	89,8 m	< 1 min
1259,7 m	Biegen Sie ab nach links	498,7 m	< 1 min
1758,4 m	Biegen Sie ab nach links	100 m	< 1 min
1858,4 m	Biegen Sie ab nach rechts	1873,3 m	4 min
3731,7 m	Ankunft bei Vorfeld V164 Zeitfenster: 08:30 - 08:45 Servicezeit: 20 min		20 min
3731,7 m	Abfahrt von Vorfeld V164		
3731,7 m	Folgen Sie dem Verlauf von in westlicher Richtung	277,1 m	< 1 min
4008,8 m	Ankunft bei Vorfeld V167 Zeitfenster: 08:30 - 09:00 Servicezeit: 15 min		15 min
4008,8 m	Abfahrt von Vorfeld V167		
4008,8 m	Wenden Sie und fahren Sie zurück in östlicher Richtung	1180,9 m	2 min
5189,8 m	Ankunft bei Vorfeld V150 Zeitfenster: 08:45 - 09:30 Servicezeit: 20 min		20 min
5189,8 m	Abfahrt von Vorfeld V150		
5189,8 m	Folgen Sie dem Verlauf von in nordöstlicher Richtung	441,6 m	< 1 min
5631,3 m	Biegen Sie ab nach links	104,1 m	< 1 min
5735,4 m	Biegen Sie ab nach rechts	82,9 m	< 1 min
5818,3 m	Ankunft bei Terminal 1 A25-2 Zeitfenster: 09:00 - 10:00 Servicezeit: 30 min		30 min
5818,3 m	Abfahrt von Terminal 1 A25-2		
5818,3 m	Folgen Sie dem Strassenverlauf in nordöstlicher Richtung	343,7 m	< 1 min
6162 m	Ankunft bei Terminal 1 A11-2 Zeitfenster: 10:00 - 10:15 Servicezeit: 20 min		20 min
6162 m	Abfahrt von Terminal 1 A11-2		
6162 m	Folgen Sie dem Strassenverlauf in östlicher Richtung	80,8 m	< 1 min
6242,8 m	Biegen Sie ab nach links	39,1 m	< 1 min
6281,9 m	Biegen Sie ab nach rechts	845,6 m	2 min
7127,4 m	Biegen Sie ab nach links	92,1 m	< 1 min
7219,6 m	Ankunft bei Vorfeld V126 Zeitfenster: 10:15 - 10:30 Servicezeit: 30 min		30 min
7219,6 m	Abfahrt von Vorfeld V126		
7219,6 m	Folgen Sie dem Verlauf von in östlicher Richtung	454,4 m	< 1 min
7674 m	Ankunft bei Vorfeld V116 Zeitfenster: 10:45 - 11:00 Servicezeit: 30 min		30 min
7674 m	Abfahrt von Vorfeld V116		
7674 m	Folgen Sie dem Verlauf von in östlicher Richtung	557,8 m	1 min
8231,8 m	Biegen Sie ab nach links	110,9 m	< 1 min
8342,7 m	Ziel bei Depot Tankdienste		
8342,7 m	Gesamtfahrzeit: 4 Stunde(n) 2 Minute(n) Gesamtentfernung: 8342,7 m Startzeit: 07:30 Ankunftszeit: 11:31		

Abbildung 29: Lösung des VRP: Tour eines einzelnen Dispensers

Das beschriebene VRP dient anschließend in vier Varianten als Eingabe für die Bestimmung der optimalen Standorte der Ladestationen mit LARS. Die Varianten unterscheiden sich durch die nutzbare Rüstzeit im Depot und durch die Wahl der Kosten zur Errichtung von Ladestationen an den Bedarfspunkten.

Variante	Rüstzeit [min]	Kosten Ladestation [k€]			Anzahl Fahrzeuge	Gesamtstrecke [km]	Längste Tour [km]	Längste Etappe [km]	Längste erste Etappe [km]
		Depot	Vorfeld	Terminal, Cargo, GAT, Wartung					
1	60	1	3	2	46	634,8	34,2	9,3	6,4
2	30	1	3	2	43	611,6	46,6	9,9	6,4
3	120	1	3	2	50	667,0	42,5	9,3	6,4
4	60	1	1	2	46	634,8	34,2	9,3	6,4

Tabelle 4: Untersuchte Varianten der Szenario-VRPs

Die Tabelle 4 zeigt die Kenndaten der Lösungen zu den Varianten. Dies sind die Anzahl der tatsächlich genutzten Fahrzeuge, die insgesamt von allen Fahrzeugen zurückgelegte Wegstrecke, die Gesamtstrecke der längsten Tour sowie die maximale gefahrene Entfernung zwischen zwei Bedarfspunkten und die längste erste Etappe vom Depot aus.

5.4 Suche der optimalen Standorte für Ladestationen

Bei der Suche nach den optimalen Standorten für die Ladestationen wird nun das in dieser Arbeit entwickelte AddIn LARS eingesetzt.

Die folgenden Abschnitte stellen die Ergebnisse der Standortsuche mit LARS für die vorgenannten vier Varianten des Szenarios Großflughafen vor. Für jede Variante ist eine Messreihe mit Variation der Parameter Laderate und Reichweite in Form eines Oberflächendiagramms dargestellt. Die Tabelle 5 zeigt zunächst die Zusammenfassung zu den nachfolgend detailliert betrachteten Varianten für eine Laderate von 0,25 km/min und eine Reichweite von 30 km.

Variante	Rüstzeit [min]	Kosten Ladestation [k€]			Anzahl Fahrzeuge	Anzahl Ladevorgänge	Anzahl Ladestationen	Anzahl Ladestationen im Feld
		Depot	Vorfeld	Terminal, Cargo, GAT, Wartung				
1	60	1	3	2	46	70	67	21
2	30	1	3	2	43	97	90	47
3	120	1	3	2	50	54	54	4
4	60	1	1	2	46	70	67	21

Tabelle 5: Ergebniszusammenfassung der Standortsuche (0,25 km/min, 30 km)

5.4.1 Variante 1

Die Durchführung der Standortsuche auf Basis des gelösten VRPs zur Variante 1 des Szenarios mit 60 Minuten Rüstzeit im Depot ergibt bei Auswahl einer Laderate von 0,25 km/min und einer maximalen Reichweite von 30 km minimale Kosten von 89 k€ bei 70 Ladevorgängen an den 67 erforderlichen Ladestationen. Die Abbildung 30 zeigt die Verteilung der nötigen Ladestationen im Untersuchungsgebiet.

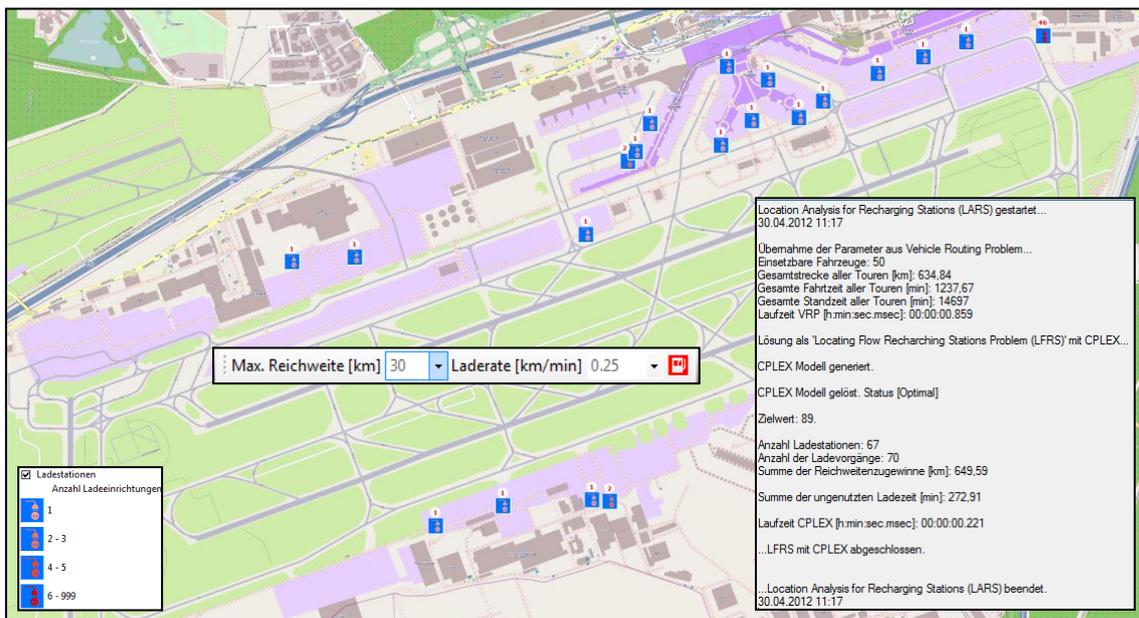


Abbildung 30: Lösung Variante 1 (0,25 km/min, 30 km)

Die Protokollausgabe zeigt, dass das Plausibilitätskriterium K1 (siehe Seite 62) erfüllt ist, denn die Summe der Reichweitengewinne liegt oberhalb der Gesamtlänge aller Touren.

Werden Reichweite und Laderate stark zurückgenommen, steigt die Anzahl der Ladevorgänge und Ladestationen erwartungsgemäß erheblich an, wie Abbildung 31 zeigt.

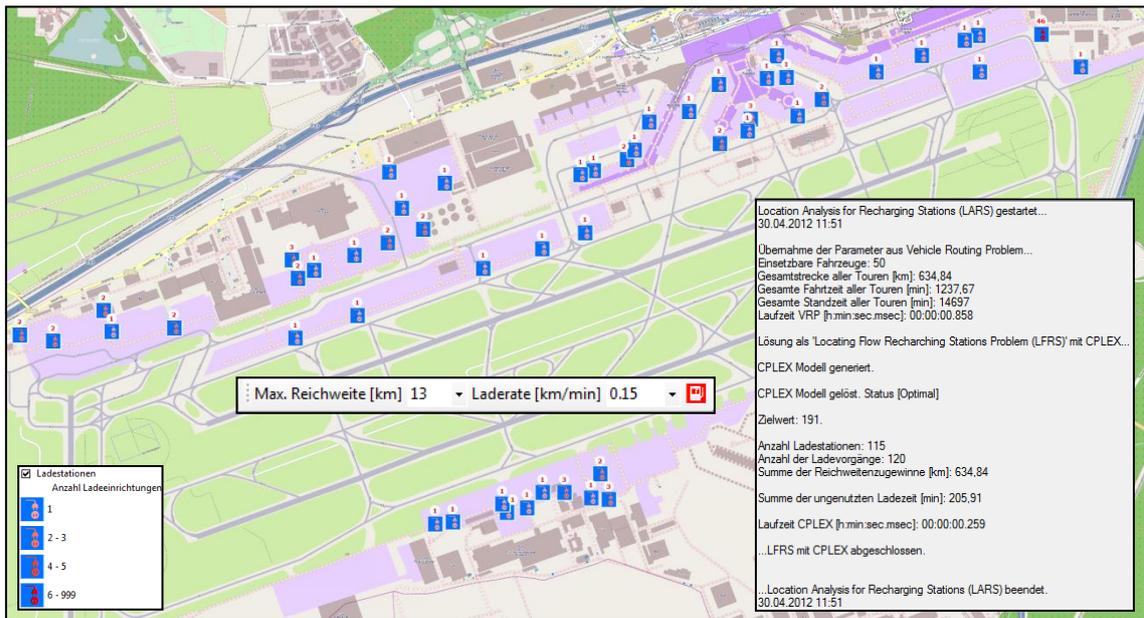


Abbildung 31: Lösung Variante 1 (0,15 km/min, 13 km)

Die anschließend unter Variation der Parameter Laderate (Intervall $[0,1 \dots 1 \text{ km/min}]$, Schrittweite $0,01 \text{ km/min}$) und Reichweite (Intervall $[8 \dots 50 \text{ km}]$, Schrittweite 1 km) aufgenommenen Ergebniswerte ermöglichen eine detaillierte, mehrdimensionale Visualisierung der Ergebnisse.

Die Abbildung 32 zeigt die Gesamtkosten für Ladestationen in Form eines Oberflächendiagramms.

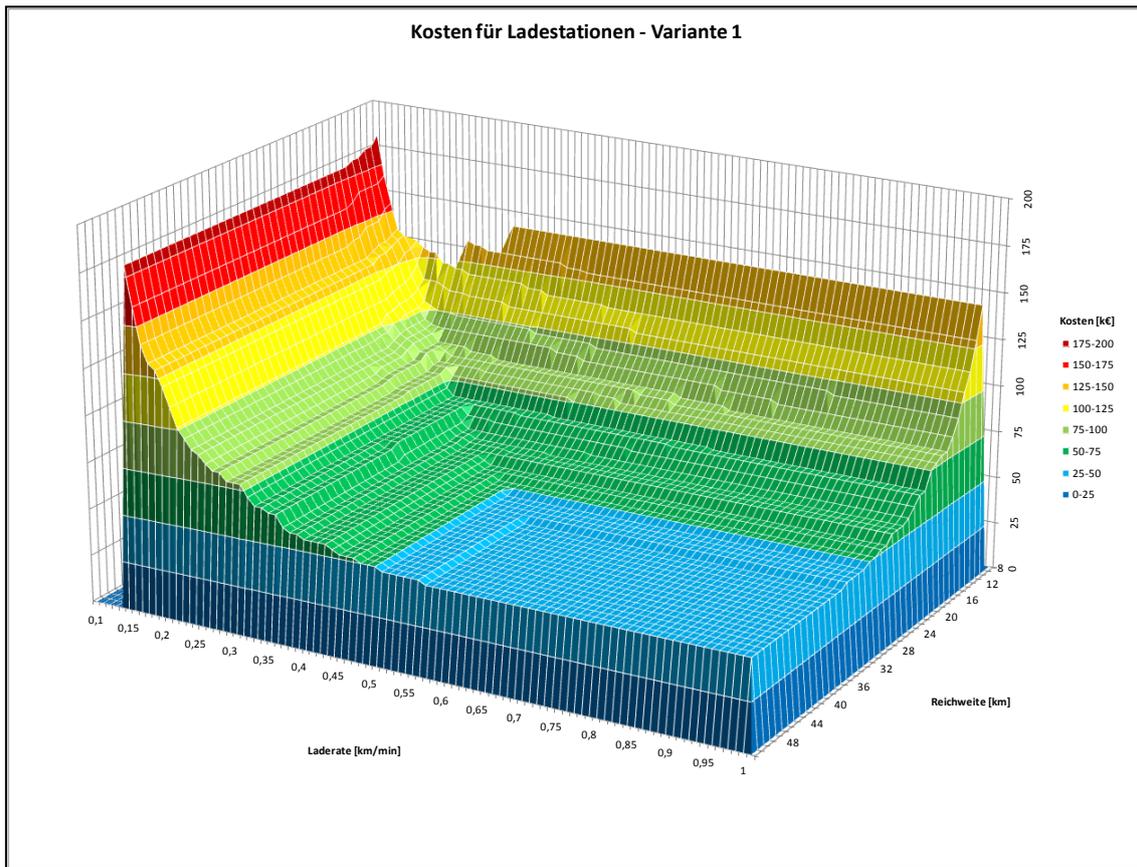


Abbildung 32: Kostendiagramm Ladestationen Variante 1

Das Diagramm zeigt zunächst, dass die Kosten für die Ladestationen sowohl mit steigender Laderate als auch mit steigender Reichweite monoton fallen, die Kriterien K5 und K6 von Seite 62 sind somit erfüllt.

Die Kosten und damit auch die Anzahl der Ladestationen erreichen ein Minimum-Plateau bei einer Laderate von 0,57 km/min und einer Reichweite von 35 km. Diese Reichweite ist größer als die längste Tour mit 34,2 km und im Depot kann ein dafür ausreichender Reichweitengewinn erzielt werden (Kriterium K4), somit sind keine Ladestationen im Feld erforderlich und die Anzahl der Ladestationen im Depot entspricht der Anzahl der genutzten Fahrzeuge.

Unterhalb von 10 km Reichweite gibt es keine gültige Lösung, da die längste Etappe 9,4 km lang ist (Kriterium K2). Ebenso gibt es dem Kriterium K3 entsprechend keine Lösung für eine Laderate von 0,10 km/min, da bei dieser Laderate im Depot nicht ausreichend für alle ersten Etappen geladen werden kann. Da auch unterhalb von 0,15 km/min keine gültige Lösung existiert, ist davon auszugehen, dass es in diesem Bereich immer mindestens eine Etappe in einer der Touren gibt, für die die mögliche Ladezeit im vorergehenden Bedarfspunkt nicht zum Erreichen des nächsten Bedarfspunkts ausreicht.

5.4.2 Variante 2

Die Variante 2 ist geprägt von der geringeren möglichen Ladezeit im Depot. Bei gleichem Arbeitspunkt (0,25 km/min Laderate, 30 km Reichweite) sind im Vergleich zu Variante 1 mehr Ladestationen im Feld nötig, wie Abbildung 33 zeigt.

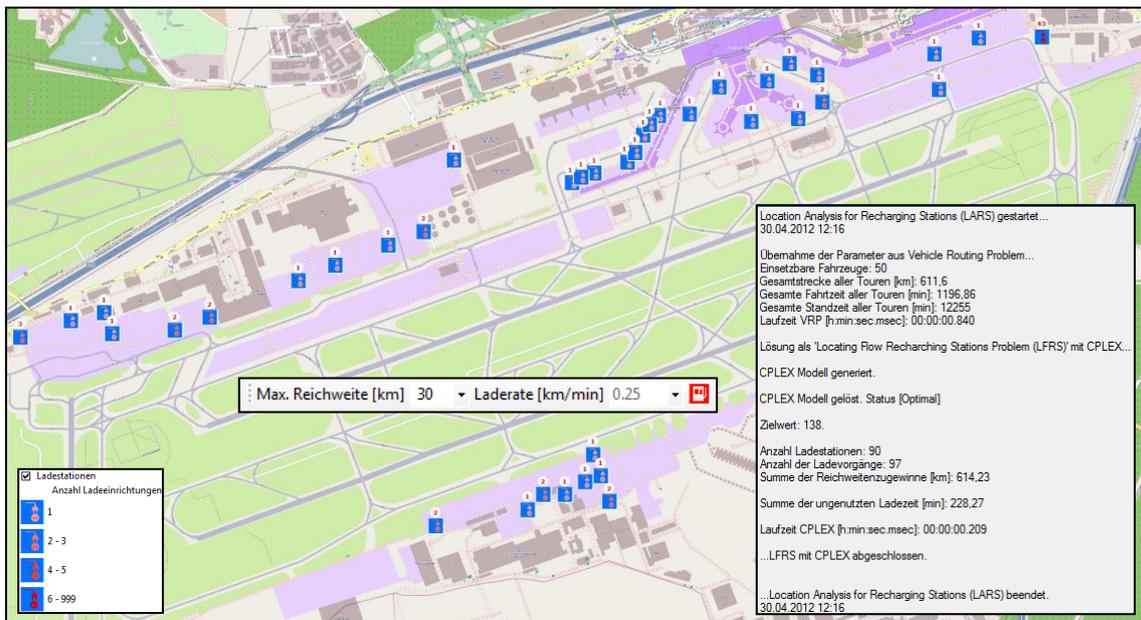


Abbildung 33: Lösung Variante 2 (0,25 km/min, 30 km)

Die analog zur Variante 1 durchgeführte Messreihe ist in der Abbildung 34 dargestellt.

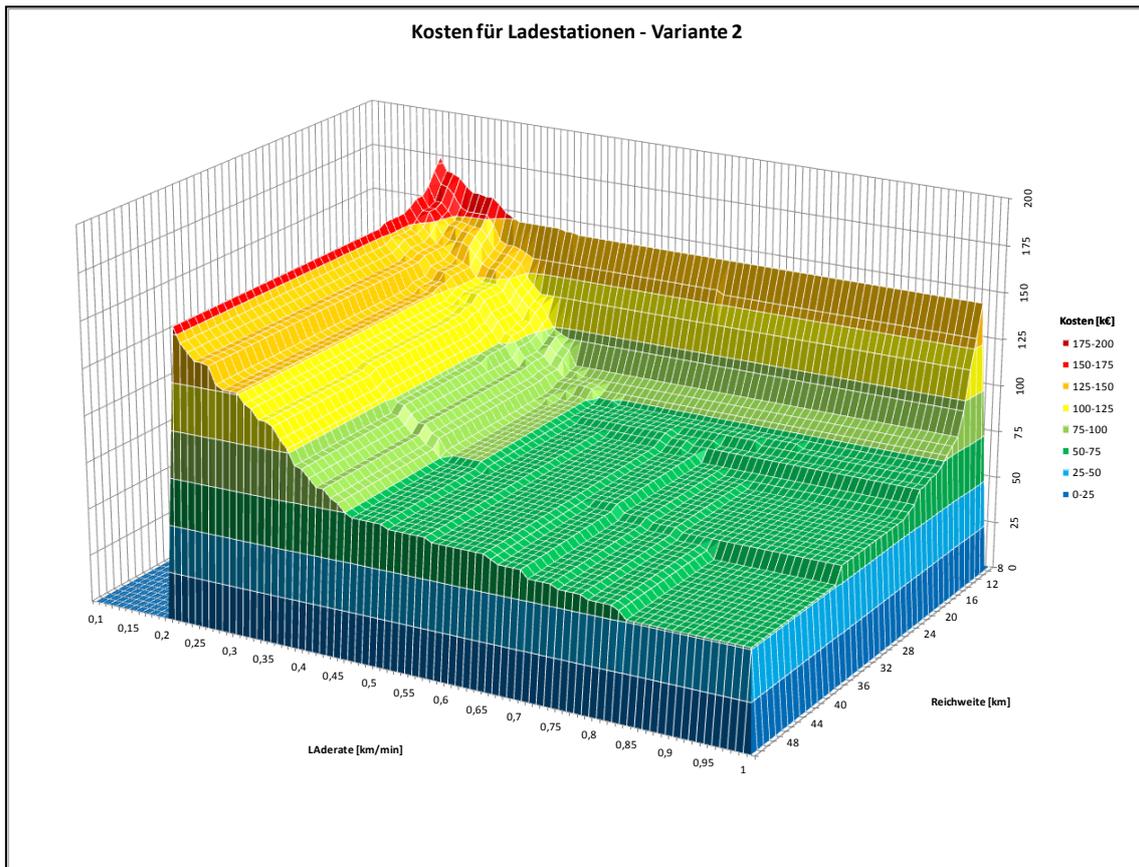


Abbildung 34: Kostendiagramm Ladestationen Variante 2

Es fällt auf, dass in dieser Variante das zu erwartende Minimum von 43 Ladestationen im Depot und somit 43 k€ Kosten auch mit einer Laderate von 1 km/min noch nicht erreicht wird. Die minimal erforderliche Laderate für die längste Tour von 46,6 km bei einer Ladezeit von 30 Minuten im Depot ist ca. 1,6 km/min. Ein weiterer Messpunkt mit einer Laderate von 1,6 km/min und 47 km Reichweite hat das Ergebnis 43 k€ und bestätigt somit das Kriterium K4.

Unterhalb einer Laderate von 0,22 km/min ist keine Lösung angezeigt, dies erklärt sich durch das Kriterium K3. Um in 30 Minuten im Depot für eine maximale erste Etappe von 6,4 km zu laden, ist eine Laderate von 0,21 km/min nicht mehr ausreichend.

5.4.3 Variante 3

In Variante 3 wirkt sich die längere potentielle Ladezeit im Depot in der Form aus, dass bei gleichem Arbeitspunkt (0,25 km/min Laderate, 30 km Reichweite) im Vergleich zu Variante 1 nur noch wenige Ladestationen im Feld erforderlich sind, siehe dazu Abbildung 35.

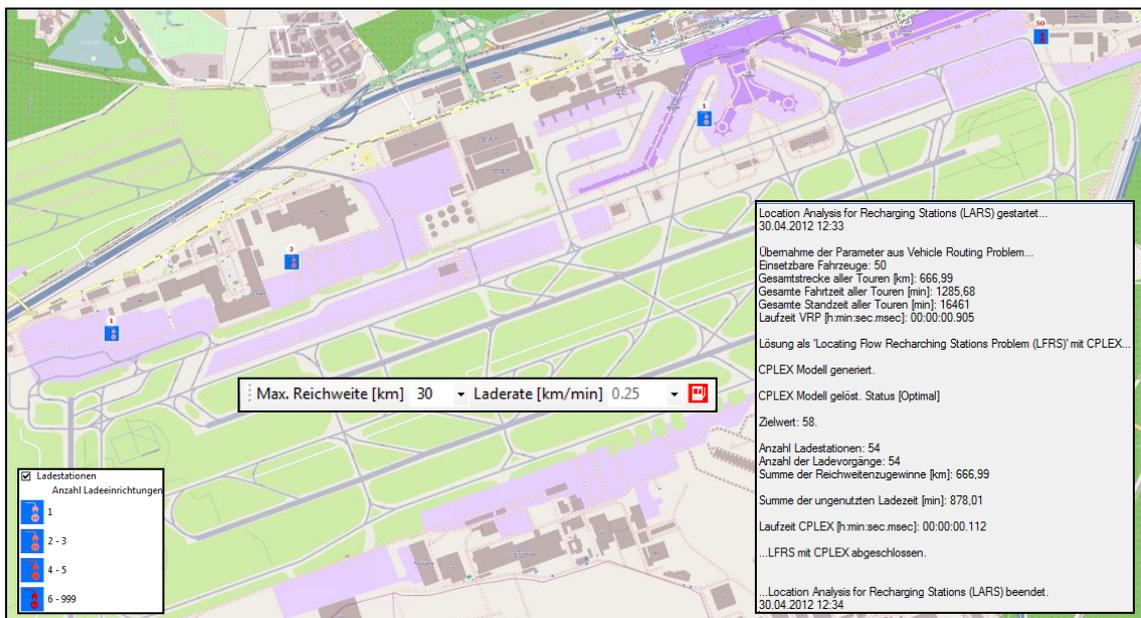


Abbildung 35: Lösung Variante 3 (0,25 km/min, 30 km)

Das Kostendiagramm zur Variante 3 zeigt, dass das Kostenminimum von 50 k€ (50 Fahrzeuge laden ausschließlich im Depot) bereits bei einer Laderate von 0,36 km/min und einer Reichweite von 43 km erreicht wird. Dies ist konform zu Kriterium K4.

Das Diagramm legt nahe, dass hier die Reichweite im Vergleich zur Laderate der stärkere Kostentreiber ist.

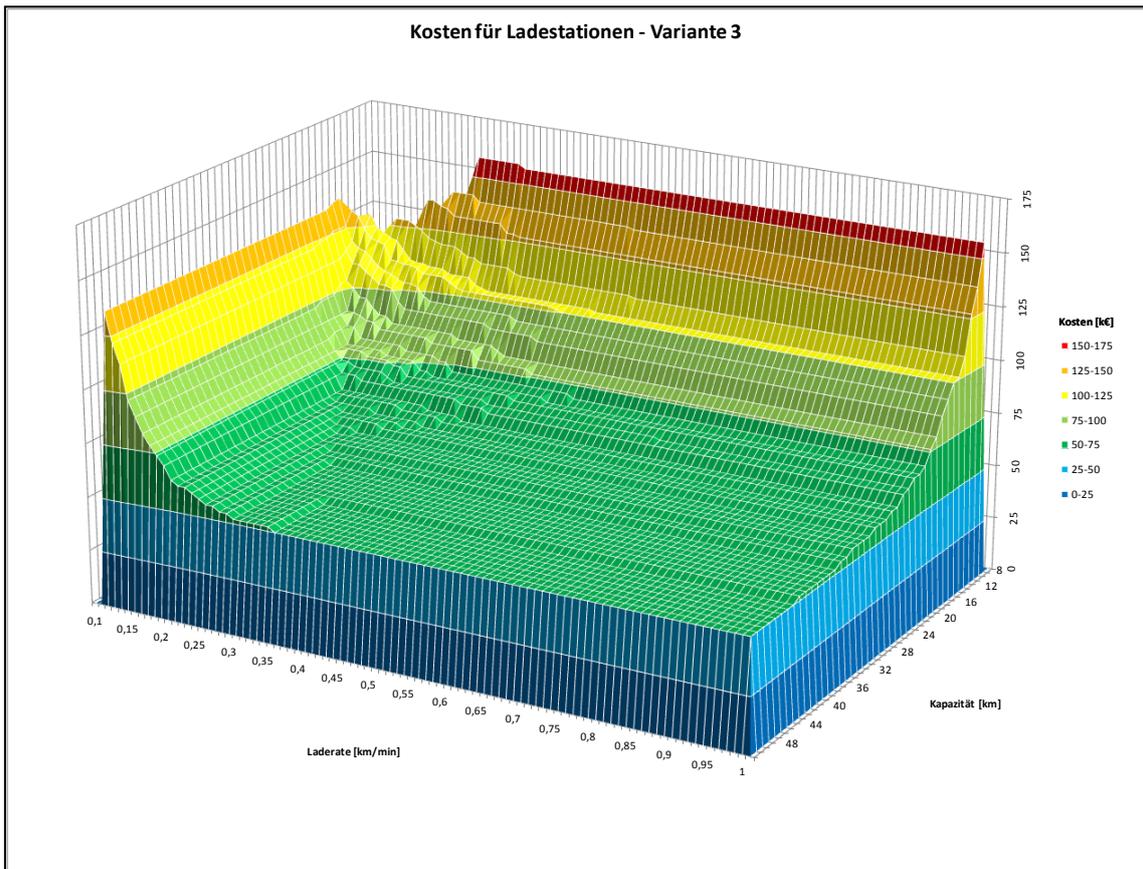


Abbildung 36: Kostendiagramm Ladestationen Variante 3

5.4.4 Variante 4

Die Variante 4 zeigt schließlich die aufgrund der geänderten Kostenzuordnung zu erwartende Verschiebung der erforderlichen Ladestationen in Richtung der Vorfelder, dies ist in Abbildung 37 zu sehen.

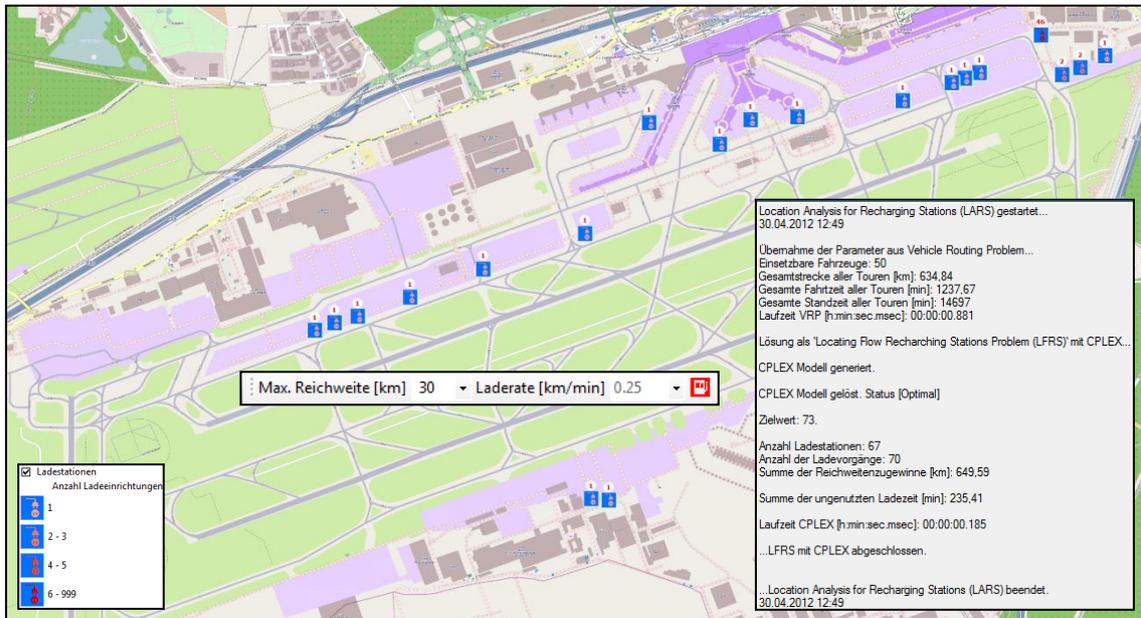


Abbildung 37: Lösung Variante 4 (0,25 km/min, 30 km)

Das Kostendiagramm in Abbildung 38 entspricht qualitativ dem Diagramm zur Variante 1, das Kostenniveau ist insgesamt etwas niedriger.

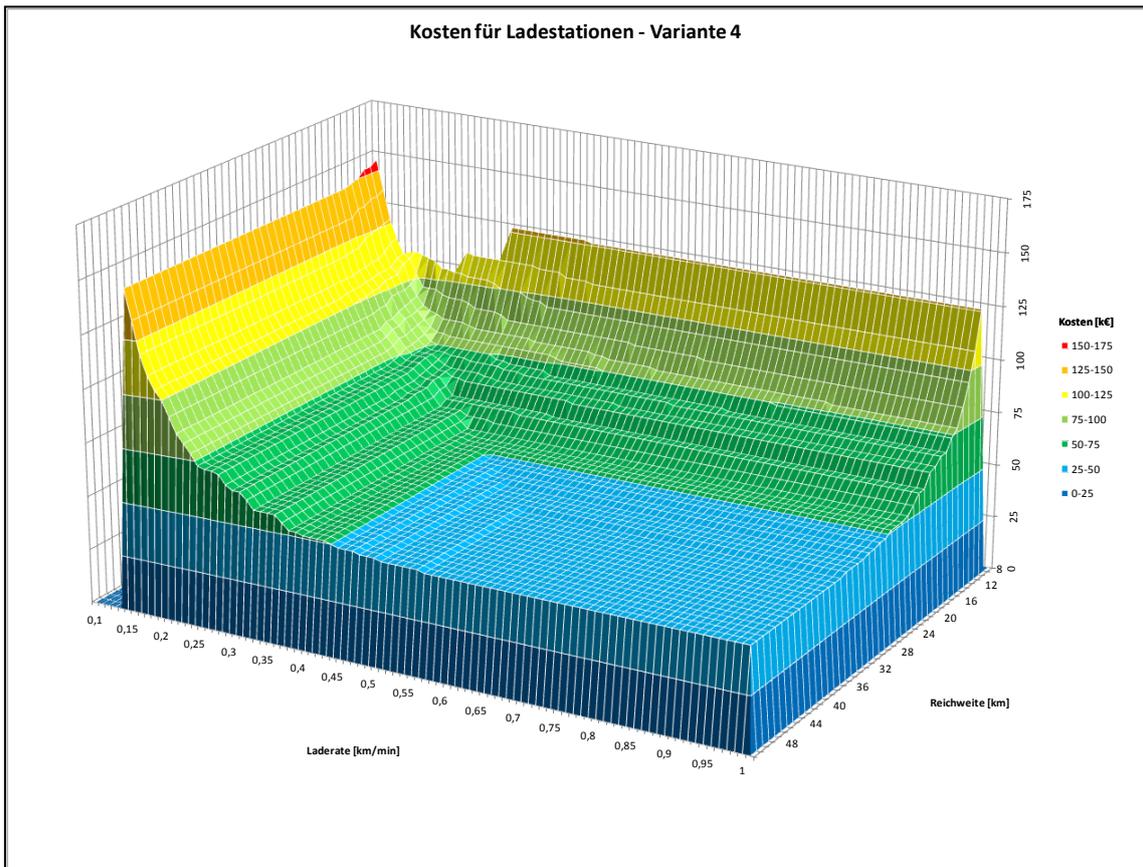


Abbildung 38: Kostendiagramm Ladestationen Variante 4

5.5 Laufzeitbetrachtung

Zur Ermittlung des Laufzeitbedarfs der Standortsuche ist die Klasse LFRS innerhalb des AddIns LARS mit einer Zeitmessung ausgerüstet. Die Laufzeitmessungen erfolgten auf einem Desktop-System mit folgender Ausrüstung:

- Apple iMac 27 mit Intel i5 CPU (2,67 GHz Quad Core), 4 GB Memory (DDR3),
- Windows 7 Home Premium, 32 Bit,
- IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.3,
- ESRI ArcGIS Desktop 10 incl. Network Analyst,
- Microsoft Visual Studio 2010.

Die in Tabelle 6 zusammengestellten Ergebnisse beziehen sich auf das vorgestellte Szenario in der Variante 2 (mit S2 bezeichnet) und zwei weitere, verkleinerte Szenarien mit weniger Aufträgen und Fahrzeugen.

Szenario	Bedarfpunkte	Aufträge	Fahrzeuge	Laufzeit Mittelwert [ms]	Standardabweichung [ms]
S0	123	22	7	50,15	61,36
S1	123	122	28	118,23	65,78
S2	123	311	43	204,95	59,93

Tabelle 6: Laufzeitmessungen OPL/CPLEX

Die Laufzeitzunahme ist bezogen auf die Anzahl Aufträge und auf die Anzahl Fahrzeuge im angegebenen Bereich sublinear. Aufgrund der Komplexitätsklasse des zugrundeliegenden Problems (vgl. Seite 36 f.) können daraus allerdings keine Vorhersagen auf die Laufzeiten bei einer weiteren Vervielfachung der Aufträge und Fahrzeuge getroffen werden.

Die Standardabweichungen beruhen bei einer Anzahl von jeweils ca. 3600 Messpunkten auf einer geringen Anzahl von Ausreißern mit Messwerten von bis zu 4 Sekunden. Dies wird als Symptom von Scheduling-, Caching- oder Paging-Effekten des Betriebssystems gewertet.

Die Laufzeiten zur Lösung des LFRS OPL-Modells liegen im Mittel deutlich unterhalb 0,5 Sekunden, damit ist die auf Seite 25 formulierte Laufzeitanforderung deutlich übererfüllt.

5.6 Zusammenfassung

Die vorangehende Beschreibung und Diskussion des Verfahrens, der Ergebnisse und der Laufzeitmessungen weist die Eignung der erarbeiteten Lösung für den Einsatz im Szenario Großflughafen nach.

Bei einer Anzahl von 50 Fahrzeugen und mehr als 300 Aufträgen sind das vorgestellte Verfahren und die integrierte Lösung im vorgestellten Szenario erfolgreich nutzbar. Die GIS-basierte Arbeitsumgebung erlaubt eine flexible Änderung der Parameter wie Laderate, Reichweite, Kosten für Ladestationen an Bedarfspunkten und Rüstzeiten im Depot.

Die Verifikation der Ergebnisse anhand der aufgestellten Plausibilitätskriterien ist erfolgreich. Abhängig von der potentiellen Ladezeit im Depot ist entweder die Laderate oder die Reichweite als primärer Kostentreiber zu erkennen.

In künftigen Beratungsgesprächen mit dem Industriepartner und dem Endkunden kann die Lösung aktiv genutzt werden, da sie aufgrund des Laufzeitverhaltens praktisch Echtzeit-fähig ist. Das ermöglicht gezielte Gegenüberstellungen alternativer Basistechnologien und Fahrzeugeigenschaften unmittelbar im Kundengespräch. Beispielsweise kann ein Kostenvergleich für Lithium-Ionen-Technologie mit Ultrakondensatoren oder eine Messreihe mit unterschiedlichen Reichweiten verschiedener Fahrzeuge ad hoc erstellt werden.

6 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der Erprobung am Szenario des Großflughafens zeigen die Eignung des in dieser Arbeit erarbeiteten Verfahrens sowie der für das eingesetzte GIS-System neu entwickelten Erweiterungskomponente. Die Plausibilität der Lösungen ist anhand der aufgestellten notwendigen Kriterien nachgewiesen, die Performance der Lösungsfindung ermöglicht sogar die Einbettung in Echtzeit-Anwendungen.

Es hat sich bestätigt, dass Methoden und Modelle aus dem Operations Research für die Beschreibung und Formalisierung der Problemstellung geeignet sind und dass mit verfügbaren Softwareprodukten (Solvem) die gesuchten Lösungen errechnet werden können.

Das eingesetzte GIS-System stellt eine nützliche Umgebung zur Datenhaltung und Datenpflege sowie zur Visualisierung der Ergebnisse bereit. Darüber hinaus kann der erste Teil der Lösungssuche, die Tourenplanung, mit Bordmitteln des GIS durchgeführt werden. Die eigentliche Suche der optimalen Standorte ist allerdings nicht mit vorhandener Funktionalität möglich. Hierzu ist in dieser Arbeit ein lineares Optimierungsmodell erstellt, in einer speziellen Notation (OPL) formalisiert, als .net-Programm implementiert und als neue Werkzeugleiste ‚Ladeinfrastrukturplanung‘ (LARS) in das GIS-System integriert worden.

In naher Zukunft soll das erarbeitete Verfahren nun an weiteren, konkreten Szenarien erprobt werden, um Ideen für Verbesserungen zu gewinnen. Als sinnvoll erscheint bereits heute - neben Detailverbesserungen wie z.B. einer für jedes Fahrzeug separat festlegbaren Reichweite - auch die Erprobung weiterer Optimierungsmodelle. Im beschriebenen Modell ist für jedes Fahrzeug, das innerhalb einer Schicht mindestens einmal an einem Bedarfspunkt lädt, eine Ladestation gefordert. Ein interessanter Ansatz wäre jetzt die Berücksichtigung der Auslastung der einzelnen Ladestationen über die betrachtete Periode. So könnten dort Stationen eingespart werden, wo die Ladebedarfe der Fahrzeuge sich innerhalb der Periode nicht zeitlich überlappen.

Eine Möglichkeit, die „Wichtigkeit“ der Ausrüstung einzelner Bedarfspunkte mit Ladestationen einzuschätzen, ist die Aufsummierung der in der Lösungssuche ermittelten Ladezeiten an den Bedarfspunkten über die betrachtete Periode. Anschließend könnte an „unwichtigeren“ Bedarfspunkten die Anzahl der möglichen Ladestationen reduziert oder auf null gesetzt und die Standortsuche erneut durchgeführt werden.

Eine Idee zur Weiterentwicklung ist die Einbeziehung der Relaxierung von Restriktionen in die Lösungssuche. So könnten nicht-lösbare Problem instanzen gezielt dahingehend untersucht werden, welche Randbedingungen in welcher Form gelockert werden müssten, um gültige Lösungen zu ermöglichen.

Wenn von der Annahme, dass keine zusätzlichen Fahrtstrecken zum Besuchen von Ladestationen in Kauf genommen werden, abgerückt wird, ergibt sich eine völlig neue Problemstellung. In diesem Fall können Tourenplanung und Standortoptimierung nicht mehr getrennt betrachtet werden, sondern verschmelzen zu einem neuen, komplexen Optimierungsproblem, da die Auswahl der Standorte erheblichen Einfluss auf die Tourenplanung bekommen dürfte.

In einigen Szenarien des Flottenbetriebes wird es schwierig sein, den Bedarf deterministisch zu definieren und daraus eine Tourenplanung abzuleiten. Bei der Betrachtung von Carsharing-Flotten etwa sind die Touren der Fahrzeuge nicht bedarfsorientiert planbar, sondern bestenfalls stochastisch beschreibbar. Die Standortplanung muss folglich auf einer anderen Basis aufsetzen.

Viele Elemente des in dieser Arbeit vorgestellten Verfahrens und der implementierten Komponenten können sicher auch bei abgewandelten Problemstellungen nutzbringend eingesetzt werden, dies gilt insbesondere auch für den Einsatz eines GIS-Systems als Rahmen für die Datenhaltung und Ergebnispräsentation sowie die Bereitstellung von räumlichen Analysefunktionen.

„We always overestimate the change that will occur in the next two years and underestimate the change that will occur in the next ten.”

Bill Gates

Abkürzungsverzeichnis

API:	Application Programming Interface (Programmierschnittstelle)
BEV:	Batterie Electric Vehicle (Fahrzeug mit rein elektrischem Antrieb)
C-LAB:	Cooperative Computing & Communication Laboratory
COM:	Common Object Model (Standard zur Erstellung von Softwarekomponenten)
DFLRM:	Deviation-Flow Refueling Location Model
EMMS:	Electric Mobility Simulation Suite
EV:	Electric Vehicle (Elektrofahrzeug)
FCLM:	Flow Capturing Location Model
FFM:	Flughafen Frankfurt am Main
FILM:	Flow Interception Location Model
FRLM:	Flow Refueling Location Model
GAT:	General Aviation Terminal (Allgemeine Luftfahrt, Privatcharter)
GFIM:	Generalized Flow Interception Model
GIS:	Geoinformationssystem
IDE:	Integrated Development Environment (Entwicklungsumgebung)
IP:	Integer Programming (Ganzzahlige Programmierung)
LARS:	Location Analysis for Recharging Stations
LFRS[M]:	Locating Flow Recharging Stations [Model]
LP:	Linear Programming (Lineare Programmierung)
LSCP:	Location Set Covering Problem
MCLP:	Maximum Covering Location Problem
MIP:	Mixed Integer Programming (Gemischt-ganzzahlige Programmierung)
OD-...:	Origin-Destination-... (Start-Ziel-...)
Opex:	Operational Expenditure (Betriebskosten ohne Anschaffungskosten)
OPL:	Optimization Programming Language
OR:	Operations Research
SDK:	Software Development Kit (Werkzeuge zur Anwendungsentwicklung)
SSSP:	Single Source Shortest Paths Problem
TCO:	Total Cost of Ownership (Gesamtbetriebskosten)
TSP:	Travelling Salesman Problem
VRP:	Vehicle Routing Problem

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Notwendige Plausibilitätskriterien	62
Tabelle 2: Anpassungen in der Datei Parameters_Airport.xml	67
Tabelle 3: Attributtabelle Bedarfspunkte (Ausschnitt).....	71
Tabelle 4: Untersuchte Varianten der Szenario-VRPs	77
Tabelle 5: Ergebniszusammenfassung der Standortsuche (0,25 km/min, 30 km).....	78
Tabelle 6: Laufzeitmessungen OPL/CPLEX.....	88

Formeln und Abbildungen

Formel 1: Locating Flow-Recharging Stations Model nach Y.-W. Wang.....	48
Formel 2: Mathematisches Optimierungsmodell LFRS	51
Abbildung 1: Struktur der Thesis	13
Abbildung 2: Objekte im Problemkontext	18
Abbildung 3: Schematische Ergebnisdarstellung	25
Abbildung 4: Übersicht Literaturstudie und verfügbare Technologie.....	27
Abbildung 5: Überblick Facility Location Problems	32
Abbildung 6: Überblick Path Finding Problems	38
Abbildung 7: Architekturübersicht der Lösung.....	45
Abbildung 8: LFRS als OPL-Model.....	53
Abbildung 9: Beispielhafte Problem Instanz für LFRS.....	54
Abbildung 10: Darstellung der Lösung zur beispielhaften Problem Instanz.....	55
Abbildung 11: Werkzeugleiste des AddIns LARS.....	56
Abbildung 12: Wichtige Klassen und Methoden des LARS AddIns	57
Abbildung 13: ArcGIS File Geodatabase	59
Abbildung 14: Generisches Vorgehensmodell	61
Abbildung 15: Modelländerung für zusätzliche Plausibilitätskontrolle des LFRS (K1*)	63
Abbildung 16: Export aus OpenStreetMap (Flughafen FFM)	65
Abbildung 17: Umformung in ArcGIS Network Dataset.....	66
Abbildung 18: Bedarfspunkte in der Übersicht.....	68
Abbildung 19: Bedarfspunkte Terminal 1 und Vorfelder	69
Abbildung 20: Bedarfspunkte Terminal 2 und Vorfelder	69
Abbildung 21: Bedarfspunkte Cargo City und Wartung Nord sowie Vorfelder.....	70
Abbildung 22: Bedarfspunkte Cargo City und Wartung Süd, GAT	70
Abbildung 23: Aufnahme der Bedarfspunkte in das Network Dataset	71
Abbildung 24: Hydrant Dispenser Esterer Model FHW	72

Abbildung 25: Hydrant Dispenser Liquip 3850LPM electric chassis.....	72
Abbildung 26: Fahrzeuge als Routen im VRP	73
Abbildung 27: Aufträge im VRP (Ausschnitt)	74
Abbildung 28: Lösung des VRP: Touren	75
Abbildung 29: Lösung des VRP: Tour eines einzelnen Dispensers	76
Abbildung 30: Lösung Variante 1 (0,25 km/min, 30 km)	79
Abbildung 31: Lösung Variante 1 (0,15 km/min, 13 km)	80
Abbildung 32: Kostendiagramm Ladestationen Variante 1	81
Abbildung 33: Lösung Variante 2 (0,25 km/min, 30 km)	82
Abbildung 34: Kostendiagramm Ladestationen Variante 2	83
Abbildung 35: Lösung Variante 3 (0,25 km/min, 30 km)	84
Abbildung 36: Kostendiagramm Ladestationen Variante 3	85
Abbildung 37: Lösung Variante 4 (0,25 km/min, 30 km)	86
Abbildung 38: Kostendiagramm Ladestationen Variante 4	87

Literaturverzeichnis

- [ADAC 2012] ADAC e.V.: ADAC Info: Kraftstoffe, Elektroantrieb, Elektroautos, <http://www.adac.de/infotestrat/tanken-kraftstoffe-und-antrieb/elektroantrieb/default.aspx>, 2012; Zugriff am 03.03.2012.
- [AIRBUS 2012] Airbus S.A.S.: A340 Family: Dimensions & Key Data, <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a340family/a340-500/specifications/>, 2012; Zugriff am 22.04.2012.
- [DORRONSORO 2006] *Dorronsoró Diaz, B.*: The VRP Web, <http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/>, 2006; Zugriff am 27.05.2012.
- [BETTER PLACE 2012] *Better Place*: The Global Provider of EV Networks and Services: The Solution, <http://www.betterplace.com/>, 2012; Zugriff am 03.03.2012.
- [BMU 2001] *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*: Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen: Protokoll und Gesetz, <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/protodt.pdf>, 2001; Zugriff am 26.02.2012.
- [BV EMOB 2012] *Bundesverband eMobilität e.V.*: Geschichte der eMobilität, <http://www.bem-ev.de/neue-mobilitat/geschichte-der-emobilitat/>, 2012; Zugriff am 26.02.2012.
- [CHURCH ET AL. 1974] *Church, R.; Velle, C. R.*: The Maximal Covering Location Problem. *Papers in Regional Science* 32 (1974), 1, S. 101–118.
- [COOK 2012] *Cook, W.*: The Traveling Salesman Problem, <http://www.tsp.gatech.edu/index.html>, 2012; Zugriff am 28.05.2012.
- [C-LAB 2011] *Cooperative Computing & Communication Laboratory*: Jahresbericht 2011, http://www.c-lab.de/fileadmin/redactors/data/Services_Downloads/C-LAB_Annual_Reports/C-LAB_2011.pdf, 2011; Zugriff am 21.04.2012.
- [C-LAB 2012] *Cooperative Computing & Communication Laboratory*: C-LAB Homepage, <http://www.c-lab.de/de/index.html>, 2012; Zugriff am 21.04.2012.
- [DANTZIG ET AL. 1959] *Dantzig, G. B.; Ramser, J. H.*: The Truck Dispatching Problem. *Management Science* Vol. 6 (1959), No. 1.
- [DANTZIG ET AL. 1954] *Dantzig, G.; Fulkerson, R.; Johnson, S.*: Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *OPERATIONS RESEARCH* 2 (1954), S. 393–410.

- [DIJKSTRA 1959] *Dijkstra, E. W.*: A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik* 1 (1959), 1, S. 269–271.
- [EMOSOLAR 2011] *EMOSOLAR e.G.*: Ladesäule EMOSOLAR "E-CHARGE", <http://www.emosolar.com/fileadmin/Proschueren/Ladesaeule-echarge.pdf>, 2011; Zugriff am 04.03.2012.
- [ENERGIEPORTAL24 2012] *energieportal24*: News: Photovoltaik (Solarstrom): Photovoltaik-Stromtankstelle in Parkpalette, http://www.energieportal24.de/artikel_3606.htm, 2012; Zugriff am 04.03.2012.
- [ESRI 2012 (1)] *Esri Inc.*: ArcObjects SDK for .NET, http://help.arcgis.com/en/sdk/10.0/arcobjects_net/ao_home.html, 2012; Zugriff am 02.06.2012.
- [ESRI 2012 (2)] *Esri Inc.*: Desktop Help 10.0 - Willkommen in der ArcGIS-Hilfebibliothek, <http://help.arcgis.com/de/arcgisdesktop/10.0/help/index.html>, 2012; Zugriff am 02.06.2012.
- [ESRI 2012 (3)] *Esri Deutschland GmbH*: Esri StreetMap Premium, <http://www.esri-germany.de/data/streetmap/index.html>, 2012; Zugriff am 02.06.2012.
- [ESTERER 2012] *Dr.-Ing. Ulrich Esterer GmbH & Co*: Flugfeldbetankung, <http://www.esterer.de/flugfeldbetankung.html>, 2012; Zugriff am 10.03.2012.
- [FICO 2012] *Fair Isaac Corporation*: FICO Xpress Optimization Suite, <http://www.fico.com/en/Products/DMTools/Pages/FICO-Xpress-Optimization-Suite.aspx>, 2012; Zugriff am 13.05.2012.
- [FRAPORT 2007] *Fraport AG*: Ausbau Flughafen Frankfurt Main: Planteil B4.2 Erläuterungsbericht Begründung Flächenbedarf, http://www.dfld.de/PFV_Landebahn/PFV-2/Ordner24/011_B4_2.pdf, 2007; Zugriff am 10.03.2012.
- [FRAPORT 2012] *Fraport AG*: Frankfurt Airport (FRA), http://www.fraport.de/content/fraport-ag/de/unternehmen/fraport_worldwide/unsere_flughaefen/frankfurt_airportfra.html, 2012; Zugriff am 22.04.2012.
- [GONCLAVES 2010] *Gonclaves, F.*: Optimization of a Distribution Network using Electric Vehicles: A VRP Problem, Universidade de Lisboa, Lisboa Portugal, 2010.
- [HAKIMI 1964] *Hakimi, S. L.*: Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *OPERATIONS RESEARCH* 12 (1964), 3, S. 450–459.
- [HAKIMI 1965] *Hakimi, S. L.*: Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretical problems. *OPERATIONS RESEARCH* 13 (1965), 3, S. 462–475.

- [HEPPNER 2006] *Heppner, C.*: Tabu-Search: Übersicht/Einführung in eine moderne Meta-Heuristik, <http://www.informatik.uni-hamburg.de/WSV/teaching/sonstiges/EwA-Folien/Heppner-Paper.pdf>, 2006; Zugriff am 20.05.2012.
- [HÖCK ET AL. 2011] *Höck, M.; Manegold, J.*: ArcMap - Programmierung mit C#. Eigenverlag, München, 2011.
- [HODGSON 1990] *Hodgson, M. J.*: A FlowCapturing Location Allocation Model. *Geographical Analysis* Vol. 22 (1990), No. 3.
- [HU ET AL. 2010] *Hu, B.; Morasch, K.; Pickl, S.; Siegle, M.*: Operations Research Proceedings 2010: Selected Papers of the Annual International Conference of the German Operations Research Society. OPERATIONS RESEARCH (2010).
- [IBM 2012] *IBM Corporation*: Software-Produkte: IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. Germany, <http://www-142.ibm.com/software/products/de/de/ibmilogcpleoptistud/>, 2012; Zugriff am 13.05.2012.
- [KIM 2010] *Kim, J.-G.*: Location of Refueling Stations for Alternative Fuel Vehicles: Considering Driver Deviation Behavior and Uneven Consumer Demand: Model, Heuristics, and GIS. Dissertation, Arizona State University, Phoenix, Arizona, USA, 2010.
- [KUBY ET AL. 2007] *Kuby, M.; Lim, S.*: Location of Alternative-Fuel Stations Using the Flow-Refueling Location Model and Dispersion of Candidate Sites on Arcs. *Networks and Spatial Economics* 7 (2007), 2, S. 129–152.
- [MEX 2009] *Mex, D.*: Tarifgesteuerte Auslastungsoptimierung von Verkehrsnetzen mit Hilfe des Geoinformationssystems ArcGIS. Bachelorarbeit, Universität Paderborn, Paderborn, 2009.
- [MIN 1989] *Min, H.*: The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points. *Transportation Research Part A: General* 23 (1989), 5, S. 377–386.
- [NAVTEQ 2012] *NAVTEQ*: Karten und Verkehr, <http://www.navteq.com/>, 2012; Zugriff am 02.06.2012.
- [WIRTH 1983] *Niklaus Wirth*: Algorithmen und Datenstrukturen. Teubner, Stuttgart, 1983.
- [OSM 2012 (1)] *OpenStreetMap Foundation*: OpenStreetMap: Die freie Wiki-Weltkarte, <http://www.openstreetmap.org/?lat=51.5&lon=-0.1&zoom=5&layers=M>, 2012; Zugriff am 02.06.2012.
- [OSM 2012 (2)] *OpenStreetMap Foundation*: OpenStreetMap Wiki, http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Main_Page, 2012; Zugriff am 22.04.2012.

- [PARAGON 2012] *Paragon Decision Technology Inc.* : AIMMS: Getting better results by making smarter decisions, <http://www.aimms.com/>, 2012; Zugriff am 13.05.2012.
- [PETERS 2010] *Peters, E.*: OpenStreetMap in ArcGIS: Automatisierte Datenaufbereitung für Netzwerkanalysen. Bachelor-Thesis, Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe, 2010.
- [PETERS 2012] *Peters, E.*: OSM2NetworkDataset, <http://52north.org/communities/geoprocessing/osm2nds/index.html>, 2012; Zugriff am 21.04.2012.
- [SOURCEFORGE 2008] *GeekNet Inc.*: lp_solve reference guide, <http://lpsolve.sourceforge.net/5.0/>, 2008; Zugriff am 13.05.2012.
- [GABLER 2012] *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*: Gabler Wirtschaftslexikon, <http://wirtschaftslexikon.gabler.de>, 2012; Zugriff am 03.03.2012.
- [STEY 2008] *Stey, S.*: Geoinformationssystem-basierte Standortsuche für Notfalldienste des öffentlichen Sektors. Bachelorarbeit, Universität Paderborn, Paderborn, 2008.
- [SUHL ET AL. 2009] *Suhl, L.; Mellouli, T.*: Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. Springer, Dordrecht, 2009.
- [TOREGAS ET AL. 1971] *Toregas, C.; Swain, R.; ReVelle, C.; Bergman, L.*: The Location of Emergency Service Facilities. *Operations Research* 19 (1971), 6, S. 1363–1373.
- [TOTH ET AL. 2001] *Toth, P.; Vigo, D.*: The vehicle routing problem. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa, USA, 2001.
- [WANG 2011] *Wang, Y.-W.*: Locating Flow-Recharging Stations at Tourist Destinations to Serve Recreational Travelers. *International Journal of Sustainable Transportation* 5 (2011), 3, S. 153–171.
- [YE 2010] *Ye, D.*: A Sustainable Solution for Public Transportation, <http://www.sinautecus.com/files/transportation.pdf>, 2010; Zugriff am 03.03.2012.
- [ZENG 2007] *Zeng, W.*: GIS Based Facility Location Planning with Different Types of Consumers. Dissertation, University of Alberta, Alberta, Canada, 2007.

Index

AddIn.....	56	Facility Location	31
Aktivitätendiagramm.....	60	Fahrzeuge.....	20
ArcCatalog	41	Fahrzeugflotte	15
ArcGIS Map Document.....	46	Features	42
ArcMap.....	41	File Geodatabase.....	41
ArcObjects Application Programming Interface	43	Flow Based Demand Models	31
ArcObjects Software Development Kit	43	Flow Capturing Location Model.....	33
Atos	11, 64	Flow Refueling Location Model	34
Aufträge.....	20	Freiheitsgrade.....	23
Backtracking.....	29	Gemischt-ganzzahlige Optimierung.....	28
Battery Electric Vehicle	13	Generalized Flow Interception Model	34
Bedarfspunkte.....	18	Generisches Vorgehensmodell.....	60
Branch&Bound.....	29	Geodatenmanagement.....	40
Closest Facility	42	Geoinformationssysteme.....	40
CO ₂ -Ausstoß.....	10	Heuristiken.....	29
Cooperative Computing & Communication Laboratory (C-LAB).....	64	Kanten.....	19
Cost-Optimal Infrastructure for EV-Fleets Model.....	35	Knoten.....	19
Covering Models	31	Kyoto-Protokoll	10
CPLEX	30	Ladeinfrastrukturplanung.....	56
Depots.....	19	Ladestationen	21
Deviation-Flow Refueling Location Model....	35	LARS	56
Dijkstra	38	Laufzeitanforderungen	25
Dispenser-Fahrzeuge	71	Laufzeitmessungen	88
Einzugsgebiete.....	42	LFRS	47
Electric Mobility Simulation Suite	64	LFRS.doc	46
Elektrofahrzeuge	15	LFRS.mod.....	46
Elektromobilität.....	9	Linear Programming	28
Entscheidungsvariablen.....	28	Lineare Optimierung.....	28
ESRI ArcGIS Desktop.....	40	Locating Flow Recharging Stations Model....	36
Etappe.....	20	Location Set Covering Problem	33
		Location-Allocation	43
		Lösungsarchitektur.....	45

Maximal Covering Location Problem	33	Probleminstanz.....	52
Median Based Models	31	Randbedingungen	24
Metaheuristiken	29	Reichweitengewinn.....	24
Microsoft Visual Studio	43	Restreichweite.....	24
Mixed Integer Programming	28	Restriktionen.....	24, 28
Nächste Einrichtung	42	Route.....	42
NAVTEQ	41	Routenfindung	37
Nebenbedingungen.....	28	Rüstzeit	73
Network Analyst Extension.....	42	Service Areas	42
Network Analyst Object Model.....	43	Simplex-Methode.....	29
Network Dataset	42	Single Source Shortest Paths Problem	38
Oberflächendiagramm	80	Solver	30
OD-Matrix.....	43	Standortoptimierung	31
OpenStreetMap.....	41	Start-Ziel-Kostenmatrix	43
Operations Research.....	28	Tabu Search	30
OPL Interface API.....	46	Touren.....	20
Optimierungssysteme	28	Tourenplanung	37
Optimierungsziel	24	Travelling Salesman Problem	38
Optimization Programming Language	30	Ultrakondensatoren	16, 89
Origin-Destination Cost Matrix.....	43	Universität Paderborn	64
OSM2NetworkDataset	46	Unterflursystem	71
Parameter.....	22	Variablen.....	23
Path Finding Problems	37	Vehicle Routing Problem.....	39, 42
p-Center Model.....	32	VRPPD for Electric Vehicles.....	39
Periode.....	21	Wegenetz	19
p-Median Model	33	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	12
Potentielle Standorte.....	21	Zielfunktionen.....	28