

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Standortplanung unter Berücksichtigung von
Tourenplanungsaspekten am Beispiel der
Konsumgüterindustrie“

Verfasser

Florian Führer

Angestrebter akademischer Grad

Magister der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften
(Mag. rer. soc. oec.)

Wien, im August 2011

Studienkennzahl lt. Studienblatt:
Studienrichtung lt. Studienblatt:
Betreuer/Betreuerin:

157
Internationale Betriebswirtschaft
Univ.-Prof. Dr. Karl Dörner

Inhalt

Kapitel 1: Einleitung	1
Kapitel 2: Theorie der Standortplanung	2
2.1 Einleitung	2
2.2 betriebliche Standortplanung	3
2.2.1 deskriptive Standorttheorie.....	4
2.2.2 normative Standorttheorie	5
2.3 Klassifizierung von Standortproblemen.....	6
Kapitel 3: Modelltheorie.....	9
3.1 Medianprobleme	9
3.2 Warehouse Location Problems (WLP-Modell).....	11
3.3 heuristische Lösungsansätze.....	13
3.3.1 Eröffnungsverfahren ADD	13
3.3.2 Eröffnungsverfahren DROP	16
3.3.3 Verbesserungsverfahren	18
3.4 exakte Lösungsverfahren: Branch-and-Bound Verfahren	19
Kapitel 4: Standortplanung in der Praxis	21
4.1 Problembeschreibung.....	21
4.2 Rohdaten.....	21
4.3 geografische Verteilung	22
4.4 Berechnungen und Erkenntnisse	23
4.4.1 ILOG OPL Development Studio	23
4.4.2 Berechnung des p-Median Problems und Erkenntnisse.....	24
4.4.3 Berechnung des Warehouse Location Problems und Erkenntnisse	30
4.5 Zusammenfassung und Probleme.....	33

Kapitel 5: Theorie der Tourenplanung	35
5.1 Einleitung.....	35
5.2 Klassifizierung von Tourenplanungsproblemen	35
5.3 Standardprobleme der Tourenplanung.....	37
Kapitel 6: Tourenplanung in der Praxis	40
6.1 Einleitung.....	40
6.2 TransIT	40
6.2.1 Allgemeines	40
6.2.2 Benutzeroberfläche	41
6.2.3 Stammdaten	42
6.3 Anwendung von TransIT	44
6.3.1 Problemcharakterisierung.....	44
6.3.2 Implementierung in TransIT	44
6.3.3 zugrundeliegender Algorithmus.....	46
6.3.4 Arbeiten mit TransIT.....	47
6.4 Erkenntnisse	50
Kapitel 7: Verzeichnisse	51
7.1 Abbildungsverzeichnis.....	51
7.2 Tabellenverzeichnis	52
7.3 Literatur.....	53
Anhang A: p-Median Implementierung	56
Anhang B: WLP Implementierung	58
Anhang C	60
Curriculum Vitae:.....	60
Abstract	61

Kapitel 1: Einleitung

Diese Diplomarbeit befasst sich mit den Fragestellungen und Problemen, die ein Standortplanungsprojekt auf strategischer Ebene für ein Unternehmen der Konsumgüterindustrie aufwirft.

Ziel der Arbeit war es, eine Empfehlung über Anzahl und Standort von neu zu errichtenden Zentrallagern abzugeben, die den über das gesamte österreichische Staatsgebiet verteilten Kundenstock abdecken sollten.

Formal teilt sich diese Arbeit in zwei Bereiche. Der erste Teil der Arbeit behandelt die Standortplanung; zuerst in der Theorie, dann in der Praxis gemäß den Vorgaben unseres Partnerunternehmens. Berechnungen wurden sowohl für das p-Median Problem als auch für das Warehouse Location Problem durchgeführt.

Um das Projekt innerhalb dieser Diplomarbeit abzurunden, befasst sich der zweite Teil der Arbeit mit Tourenplanungsaspekten auf Basis der Erkenntnisse der Standortplanung. Auch hier wurde zunächst die Theorie behandelt, ehe auf die praktischen Aspekte eingegangen wurde. Da ein komplette und ausführliche Tourenplanung für dieses Projekt den Rahmen dieser Diplomarbeit gesprengt hätte, entschlossen wir uns die Planung mit Hilfe der Tourenplanungssoftware TransIT der Firma GTS Systems & Consulting GmbH durchzuführen. Der praktische Tourenplanungsteil der Arbeit befasst sich also vorwiegend mit der Arbeit mit TransIT und den daraus resultierenden Erkenntnissen.

Kapitel 2: Theorie der Standortplanung

2.1 Einleitung

Die Problematik der Standortplanung ist in Grundzügen seit langem bekannt. Schon im Mittelalter durften zum Beispiel Mühlen nicht weit entfernt vom Sitz des Grundherren liegen, dennoch sollten möglichst viele Untertanen die Mahlstätten zu Fuß oder bestenfalls mit ihren Maultieren erreichen können. Zudem war meistens noch die Notwendigkeit eines geeigneten Wasserlaufs zu bedenken. Die Festlegung auf den „optimalen“ Standort erfolgte allerdings lange Zeit entsprechend dem Gefühl bzw. der Erfahrung des Entscheidungsträgers. Dieser kleine Exkurs in die Vergangenheit soll zeigen, dass sich die Menschheit seit dem Bestehen von Wirtschaftskreisläufen – wenn auch oft unbewusst – mit der Standortplanung beschäftigten. Erste wissenschaftliche Ansätze lassen sich ab dem 19. Jahrhundert erkennen. So untersuchte z.B. v. Thünen 1826 „die Anordnung landwirtschaftlicher Produktionszweige in einem isolierten Staat mit einem Absatzort [...]“ während Launhardt 1882 mit seinem Werk *Standortbestimmung im Dreieck* eine der ersten Arbeiten zur betrieblichen Standortplanung verfasste.¹

Im Allgemeinen sind Standortprobleme den strategischen Planungsproblemen zuzuordnen. Der Entscheidungshorizont ist langfristig; einmal getroffene und umgesetzte Entscheidungen sind aus finanziellen und organisatorischen Gründen, wenn überhaupt, nur langfristig wieder zu ändern. In Einzelfällen können Standortprobleme auch taktische Entscheidungen beinhalten (z.B. bei interimistischer Miete eines Depots), diese sollen in dieser Arbeit allerdings keine Beachtung finden. Während in der Literatur zwischen volkswirtschaftlichen Standorttheorien, betrieblicher Standortplanung und innerbetrieblicher Standortplanung unterschieden wird², soll sich die vorliegende Arbeit ausschließlich mit Themen der betrieblichen Standortplanung auseinandersetzen. In diesem Sinne ist der Begriff Standortplanung, sofern nicht explizit anders angegeben, im Verlauf der Arbeit mit dem Begriff der betrieblichen Standortplanung gleichzusetzen.

¹ Vgl. Domschke, Drexl (1996), S.2

² Vgl. Domschke, Drexl (1996), S.1ff.

2.2 betriebliche Standortplanung

Im Vergleich zur innerbetrieblichen Standortplanung, bei der das interne Layout – d.h. die räumliche Anordnung von z.B. Maschinen, Lagereinrichtungen etc. – eines Betriebes betrachtet wird, setzt die betriebliche Standortplanung eine Ebene höher, bei der Standortwahl einzelner Betriebe oder Lager, an.

Eine schöne Definition der Standortplanung findet sich in *Bruns (1998)*:

„Unter einer betrieblichen Standortplanung versteht man [...] die Bestimmung von optimalen bzw. hinreichend guten Standorten für betriebliche Einrichtungen im Hinblick auf eine oder mehrere Zielgrößen unter Einhaltung von gegebenen Restriktionen.“³

Die häufigste Zielgröße ist die Minimierung der Transportwege zwischen Betrieben bzw. Lagern und Kunden und die damit einhergehende Minimierung der in Relation stehenden Kosten. Als Beispiele für Restriktionen können, unter anderem, die Festsetzung der Anzahl an zu eröffnenden Standorten sowie die Begrenzung von Lager- bzw. Transportkapazitäten genannt werden.

Gudehus (1999) definiert den Begriff des optimalen Standortes wie folgt:

„Der optimale Logistikstandort ist der Standort, für den die Summe der Betriebskosten und der Transportkosten minimal ist.“⁴

Die Befassung mit der Standortplanung wird für ein Unternehmen unter anderem notwendig, wenn

- ein Unternehmen gegründet wird
- ein Unternehmen expandiert und neue Filialen, Betriebe bzw. Lagerstandorte eröffnet
- ein Logistiksystem vollkommen neu aufgebaut werden soll
- ein bestehendes Logistiksystem überarbeitet oder erweitert wird
- sich die regionale Nachfrage dauerhaft verschiebt
- neue Produkte eingeführt werden, die regional unterschiedlich abgesetzt werden

³ Bruns (1998), S.13

⁴ Gudehus (1999), S. 715

Ist eine Standortplanung durchzuführen, lassen sich zwei Ansätze unterscheiden. Die deskriptive Standorttheorie einerseits beschäftigt sich mit der Einführung eines begrifflichen Instrumentariums zur allgemeingültigen Beschreibung der Prämissen und Abläufe von Standortentscheidungsprozessen. Zum Anderen beschreibt die, in vielen Fällen nachgelagerte, normative Standorttheorie die Entwicklung intersubjektiv nachprüfbarer Kriterien – wie Modelle – durch deren Einsatz Standortprobleme gelöst und entsprechende Entscheidungen getroffen werden können.⁵ In der Folge sollen beide Ansätze genauer betrachtet werden.

2.2.1 deskriptive Standorttheorie

Ziel der deskriptiven Standorttheorie ist unter anderem die Bereitstellung und Aufbereitung von Informationen einen bestimmten Standort betreffend, ohne eine konkrete Standortempfehlung abzugeben. Es sollen lediglich die Eigenschaften der verschiedenen Standorte herausgearbeitet, bewertet und katalogisiert werden. Daraus ergibt sich in weiterer Folge ein für den jeweiligen Betrieb relevanter Katalog an Standortfaktoren. Ein, aufgrund der Individualität der Bedürfnisse jeder einzelnen Standortentscheidung nicht als vollständig zu betrachtender, möglicher Katalog an Standortfaktoren nach *Domschke & Drexel (1996)* ist in Tab. 1 dargestellt.

Grund und Boden	Arbeitskräfte
Lage und Größe	Potential (Anzahl)
Expansionsmöglichkeiten	Ausbildungsstand
Erschließung	
Bebauungsvorschriften	
Verkehr und Transport	Beschaffung und Entsorgung
Straßennetz	Roh-, Hilfs-, und Betriebsstoffe
Schienennetz	Energie
Binnenschiffahrt bzw. Seehafen	Wasser
Flughafen	Abfallbeseitigung
Produktion	Absatz
Klimatische Bedingungen	Bevölkerungspotential
Ersatz für Maschinen	Konsumgewohnheiten
	Kaufkraft
	Konkurrenz
	Absatzfördernde Einrichtungen

⁵ Vgl. Domschke, Drexel (1996), S. 5

Investition und Finanzierung	Öffentliche Hand
Bauunternehmen	Bevölkerungspotential
Investitionsgüterhersteller	Steuervergünstigungen
Kreditinstitute	
Allgemeine Infrastruktur	Persönliche Präferenzen
Wohnraum	Wohnlage
Bildungseinrichtungen	Erholungs- und Urlaubsmöglichkeiten
Kulturelle Einrichtungen	
Medizinische Versorgung	

Tab. 1: Katalog von Standortfaktoren⁶

Oftmals ist die deskriptive der normativen Standortplanung vorgelagert, um mit Hilfe der Analyse der Standortfaktoren aus einer Menge an möglichen Standorten ein reduziertes Set an Standorten herauszufiltern, die letztendlich in die konkrete Planung einbezogen und mit entsprechenden Modellen berechnet werden können.

2.2.2 normative Standorttheorie

In der normativen Standorttheorie wird mit Hilfe verschiedener Modelle versucht ein konkretes Planungsproblem zu lösen und eine individuelle Standortempfehlung abzugeben bzw. in weiterer Folge eine Standortentscheidung zu treffen. Hierfür sind im Besonderen zwei Modelltypen von Bedeutung:

- Modelle zur Standortbestimmung in der Ebene
- Modelle zur Standortbestimmung in Netzen

Erstere gehen davon aus, dass bei einer Anzahl n Kunden, die über eine homogene Fläche verteilt sind, jeder Punkt innerhalb dieser Fläche als möglicher Depot- bzw. Betriebsstandort gesehen wird. Zur Lösung des Problems werden von den Modellen die transportkostenminimalen Standorte ermittelt, wobei die Transportkosten mit der kumulierten Strecke, welche die Transportfahrzeuge zurückgelegt haben, gleichzusetzen sind.

Im Gegensatz dazu, befasst sich diese Arbeit mit der Standortbestimmung in Netzen. Gegeben ist ein Netz aus Knoten, an denen die zu beliefernden Kunden angesiedelt sind. Verbunden sind sie durch Kanten, die Transportwege darstellen. Darüber

⁶ Domschke, Drexl (1996), S.9

hinaus gibt es eine bestimmte Anzahl an potentiellen Standorten für Betriebe oder Depots, die durch eine Vorauswahl mittels in Kapitel 2.2.1 beschriebener Verfahren ermittelt werden können. Für jeden potentiellen Standort lassen sich Fixkosten, Kapazitätsbeschränkungen sowie gegebenenfalls variable Kosten berücksichtigen. Entlang der Kanten entstehen variable Transportkosten zwischen möglichen Depotstandorten und Kunden. Ziel ist es, einen oder mehrere optimale bzw. bestmögliche Standorte so zu wählen, dass die Summe aus fixen Depotkosten und variablen Transportkosten unter Berücksichtigung aller Kapazitätsbeschränkungen minimiert wird.

Im Zuge der normativen Standortplanung sind unter anderem folgende Fragen zu klären:

- Wie viele Depots werden zur Erfüllung der Nachfrage benötigt?
- Wo befinden sich mögliche Standorte?
- Sollen die Depots als Regional- oder Zentrallager geplant werden?
- Sind einzelne Kunden einem bestimmten Depot zuzuordnen oder frei planbar?
- Ist das Transportproblem mit den vorhandenen Ressourcen adäquat lösbar?

2.3 Klassifizierung von Standortproblemen⁷

Neben der oben beschriebenen Unterscheidung zwischen Standortplanung in der Ebene und in einem Netz, lassen sich noch eine Vielzahl weiterer Merkmale anführen, durch die sich Standortplanungsmodelle unterscheiden können. In der Folge sollen diese kurz diskutiert werden.

(1) Anzahl an zu planenden Einrichtungen

Grundsätzlich muss zwischen Ein- und Mehrstandort Modellen unterschieden werden, je nachdem wie viele Standorte realisiert werden sollen. Diese Anzahl kann einerseits durch eine Variable innerhalb eines Modells dargestellt und berechnet werden (siehe WLP), aber auch vorgegeben sein (insbesondere p-Median Probleme).

⁷ Vgl. Bruns (1998), S.22 ff.

(2) Einprodukt- vs. Mehrproduktmodelle

Ist im Hinblick auf Produktion und Transport nur ein einziges Produkt vorhanden bzw. können verschiedene Produkte als ident betrachtet werden (Volumina, homogene Verpackungseinheiten, etc.), so kann die Planung unter Kumulierung unter einem Standardprodukt erfolgen. Ist dies nicht der Fall, muss ein Mehrproduktmodell formuliert werden, was wiederum Konsequenzen hinsichtlich der Komplexität mit sich bringt.

(3) kapazitierte vs. unkapazitierte Probleme

Unter kapazitierten Problemen versteht man Standortplanungsprobleme, bei denen die Kapazität der Depots bzw. Transportmittel mengenmäßig vorgegeben ist. Dies führt zu erhöhter Realitätsnähe allerdings bei steigender Komplexität, insbesondere, wenn ein Kunde aufgrund von Kapazitätsrestriktionen nicht mehr vom günstigsten Depot aus beliefert werden kann oder die Nachfrage sogar auf mehrere Depots aufgeteilt werden muss. Ist dies nicht der Fall, d.h. geht man von unendlich großen Lagerkapazitäten aus, spricht man von unkapazitierten Problemen.

(4) statische vs. dynamische Modelle

Im Unterschied zu statischen Modellen, bei denen davon ausgegangen wird, dass eine bestimmte Periode repräsentativen Charakter für die Zukunft besitzt, ändert sich bei dynamischen Modellen die Nachfrage im Lauf der Zeit. Hierfür muss in den Modellen zusätzlich zu geografischen Informationen auch der Faktor Zeit miteinbezogen werden.

(5) Pendelbelieferung vs. Belieferung durch Touren

Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit von Standortproblemen ergibt sich durch die Belieferungsart. Während bei der Pendelbelieferung die Kunden einzeln und direkt angefahren werden, berücksichtigen andere Modelle Tourenplanungsaspekte, wobei mehrere Destinationen zu einer Tour zusammengefasst werden. Dadurch steigt allerdings wiederum der Grad der Komplexität.

(6) eindeutige vs. nicht eindeutige Zuordnung der Nachfragepunkte

Bei kapazitierten Standortplanungsproblemen ergeben sich durch beschränkte Kapazitäten die Möglichkeiten, dass ein Kunde von mehreren Depotstandorten aus beliefert werden kann oder eine Zuordnung erzwungen wird. Bei unkapazitierten Standortproblemen stellt sich die Frage der Zuordnung grundsätzlich nicht, da hier die Zuordnung ohnehin von eindeutiger Natur ist.

(7) erwünschte vs. unerwünschte Einrichtungen

In der Standortplanung kann zwischen erwünschten und unerwünschten Einrichtungen unterschieden werden. Erstere sollen so nah wie möglich beim Kunden lokalisiert sein. Beispiele sind Depots, Krankenhäuser, Feuerwehrationen, etc.

Unerwünschte Einrichtungen hingegen sollen unter Berücksichtigung der Kostenoptimalität möglichst weit von Ballungsräumen und Wohngebieten entfernt liegen (z.B. Mülldeponien, Kraftwerke, Schwerindustrie, etc.). Dies führt in der Regel zu Modellen mit mehreren Zielfunktionen.

(8) Tourenplanungsaspekte

Klassifizierungen resultierend aus der Berücksichtigung von Tourenplanungs-aspekten ergeben sich durch verschiedenste zusätzliche Nebenbedingungen wie Zeitfenster, Fahrzeugkapazitäten, maximalen Tourdauern, etc.

Kapitel 3: Modelltheorie

Wie schon eingangs erwähnt, beschäftigt sich diese Arbeit mit der Standortplanung in Netzwerken. In diesem Abschnitt sollen die dafür wichtigsten Modelle – Median- und Warehouse Location Problems – vorgestellt und besprochen werden. Diese Modelle zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine relativ einfache Möglichkeit zur Lösung von Problemen, welche sich die Minimierung der Summe aus variablen Transportkosten und fixen Standortkosten zum Ziel setzen, darstellen.

3.1 Medianprobleme

Medianprobleme stellen die einfachste Variante zur Standortplanung dar. Innerhalb eines Netzes aus Knoten, welche die Nachfragepunkte darstellen, und Kanten, die die Transportdistanz – und somit die Transportkosten – bezeichnen, soll jener Punkt gefunden werden, der die geringste gewichtete Distanzsumme zu den einzelnen Knoten aufweist.

Definition:⁸ Als Median eines ungerichteten Graphen mit Kantenbewertung d_{ij} Knotenbewertung b_j , mit jeweils nichtnegativem Charakter, bezeichnet man jenen Knoten, bei dem $\sigma(i) = \sum_{j \in V} d_{ij} b_j$ minimal ist.

Ist der gegebene Graph gerichtet, d.h. dürfen bestimmte Kanten nur einseitig befahren werden (z.B. Einbahnen), muss zwischen sogenannten In- und Out-Medianen unterschieden werden und die Definition wie folgt abgeändert werden.

Definition:⁸ Innerhalb eines gerichteten Graphen bezeichnet man jenen Knoten für den gilt $\sigma_{out}(i) = \sum_{j \in V} d_{ij} b_j = \min$ als Out-Median, jenen für den mit $\sigma_{in}(i) = \sum_{j \in V} d_{ji} b_j$ die Summe der gewichteten Entfernungen von i zu jedem Knoten j minimal ist als In-Median. In diesem Sinne ist der Median in einem gerichteten Graphen jener Knoten, für den gilt:

$$\sigma_{out}(i) + \sigma_{in}(i) = \sum_{j \in V} (d_{ij} + d_{ji}) b_j = \min.$$

⁸ Domschke, Drexl (1996), S. 42

Medianprobleme charakterisieren sich unter anderem auch dadurch, dass keine Depotöffnungskosten miteinbezogen werden und die Anzahl der zu ermittelnden Standorte extern vorgegeben und somit begrenzt ist.

Sollen mehrere Standorte gefunden werden, spricht man vom p-Median Problem, das sich wie folgt formulieren lässt:

- d_{ij} Distanz von Depot i zu Kunde j
- b_j Bedarf bei Kunde j
- P Anzahl der zu eröffnenden Depotstandorte
- x_{ij} Entscheidungsvar.: Kunde j wird von Depot i bedient
- y_i Entscheidungsvariable: Depot wird eröffnet

Zielfunktion:

$$\min F(x, y) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} b_j x_{ij} \quad (1)$$

unter den Nebenbedingungen:

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \text{für } j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = P \quad (3)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \text{für } i \in I, j \in J \quad (4)$$

$$x_{ij}, y_i \in \{0, 1\} \quad \text{für } i \in I, j \in J \quad (5)$$

Die Zielfunktion (1) des p-Median Problems besagt, dass die Summe der Distanz zwischen Depot i und Kunde j , gewichtet mit der Bedarfsmenge des Kunden j , minimiert werden muss, sofern ein Transport zwischen Depot i und Kunde j stattfindet. Bedingungen (2) stellen sicher, dass jeder Kunde einem Depot zugeordnet ist, während Gleichung (3) die Anzahl der zu eröffnenden Depots P vorgibt.

Bedingungen (4) gewährleisten, dass ein Transport von i nach j nur dann stattfinden darf, wenn sich an Position i auch ein geöffnetes Depot befindet.

Mit Hilfe des p -Median Modells soll in erster Linie geklärt werden, ab wann ein zusätzliches Depot im Vergleich zum Aufwand nur mehr eine zu geringe Kostenreduktion mit sich bringt. Desweiteren kann gezielt nach den optimalen Standorten einer extern vorgegebenen Anzahl an Depots gesucht werden.

Da es sich bei p -Median Problemen um Spezialfälle von unkapazitierten, einstufigen Warehouse Location Problems (kurz WLP) handelt, sind die entsprechenden Lösungsansätze auch hierfür anwendbar.

3.2 Warehouse Location Problems (WLP-Modell)

Der Unterschied zwischen dem Median Problem und dem WLP besteht in erster Linie darin, dass beim WLP die Anzahl der zu eröffnenden Depots nicht mehr extern vorgegeben ist und dass für zu eröffnende Depots Fixkosten f_i veranschlagt werden. Die optimale Anzahl der zu realisierenden Lagerstandorte, sowie deren geografische Position ergeben sich aus dem Verhältnis der Fixkosten für das Depot zur Summe der Transportkosten.

Man unterscheidet primär zwischen unkapazitiertem und kapazitiertem WLP. Während bei ersteren keinerlei Kapazitätsrestriktionen getroffen werden, wird schon in der einfachsten Version des kapazitierten WLP angenommen, dass die Kapazitäten des Lagerstandortes begrenzt sind und somit eine Maximalkapazität M_j nicht überschritten werden darf. In weiterer Folge kann zwischen ein- und mehrstufigen WLP unterschieden werden. Die Modelle unterscheiden sich in erster Linie dadurch, dass mehrstufige WLP zumindest zwei Transportstufen berücksichtigen und verschiedene Typen von Standorten gesucht werden (z.B. Zentrallager, Verteilerdepots, Regionallager, etc.).

Da für unser Projekt angenommen wurde, dass es nur Transporte zwischen Depot und Endkunde gibt und die Depots zudem beliebig groß sein dürfen, ist hierfür vorrangig das einstufige, unkapazitierte WLP interessant und soll im weiteren Verlauf der Arbeit genauer betrachtet werden.

Mathematisch kann das unkapazitierte WLP-Modell wie folgt beschrieben werden:

- c_{ij} Transportkosten von Depot i zu Kunde j
 f_i Fixkosten zu Eröffnung von Depot i
 x_{ij} Entscheidungsvar.: Kunde j wird von Depot i bedient
 y_i Entscheidungsvariable: Depot wird eröffnet

Zielfunktion:

$$\min F(x, y) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I} f_i y_i \quad (6)$$

Unter den Nebenbedingungen:

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \text{für } j \in J \quad (7)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \text{für } i \in I, j \in J \quad (8)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \text{für } i \in I, j \in J \quad (9)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (10)$$

Die Zielfunktion (6) des WLP summiert die entstehenden Fixkosten f_i , wenn ein Depot eröffnet wird, mit den variablen Kosten c_{ij} , die durch einen Transport von Depot i zu Kunde j entstehen, und soll diese minimieren. Die Nebenbedingungen des WLP stellen sicher, dass die Nachfrage eines jeden Kunden vollständig befriedigt wird (7) sowie dass ein Kunde nur dann von einem Standort i beliefert werden kann, wenn dort auch die Errichtung eines Depots geplant ist (8).

Der offensichtlichste Vorteil des WLP gegenüber dem P-Median Problem ist, dass die Fixkosten, die durch die Eröffnung eines Depots entstehen, in das Modell

einfließen. Dies führt zu einem höheren Realitätsgrad, allerdings bei gleichzeitig steigender Komplexität der Berechnungen. Mittels WLP wird somit neben der Bestimmung der optimalen Standorte parallel die der Kostenstruktur des jeweiligen Problems entsprechende optimale Anzahl an zu eröffnenden Depots ermittelt. Ein zusätzliches Depot wird nur dann eröffnet, wenn die Summe der aufgrund kürzerer Transportwege eingesparten Transportkosten die Fixkosten der Depoteröffnung übersteigen.

3.3 heuristische Lösungsansätze

Aufgrund des hohen Rechenaufwands, den WLPs verursachen, wurde eine Zahl an Heuristiken entwickelt, die zur Lösungsfindung beitragen sollen. Grundsätzlich lässt sich die Unterscheidung zwischen

- Eröffnungsverfahren und
- Verbesserungsverfahren

treffen, die in der Folge näher betrachtet werden sollen. Über alle Verfahren gilt folgende Notation nach *Domschke und Drexl (1996)*:⁹

I	Menge aller potentiellen Standorte, $I := \{1, \dots, m\}$
I_0	Menge der endgültig verbotenen Standorte (y_i endgültig fixiert zu 0)
I_0^{vl}	Menge der vorläufig verbotenen Standorte (y_i vorläufig fixiert zu 0)
I_1	Menge der endgültig einbezogenen Standorte (y_i endgültig fixiert zu 1)
I_1^{vl}	Menge der vorläufig einbezogenen Standorte (y_i vorläufig fixiert zu 1)
ω_i	Transportkostensparnis, falls Standort i realisiert wird
F	Gesamtkosten

3.3.1 Eröffnungsverfahren ADD

Dieses, zu den Greedy-Algorithmen zählende, Verfahren war einer der Ersten wissenschaftlichen Ansätze zur Lösung von unkapazitierten WLPs und wurde in *Kuehn und Hamburger (1963)* vorgestellt. Grundgedanke des ADD-Algorithmus ist

⁹ Vgl. Domschke, Drexl (1996), S.60 ff.

die Annahme, dass originär alle Standorte als vorläufig verboten angesehen werden. Schritt für Schritt werden jene Depots, deren Eröffnung die größte Reduktion des Zielfunktionswertes – das heißt die maximale Kostenersparnis -bedeutet, zur Menge der endgültig erlaubten Standorte hinzugefügt. Dies wird so oft wiederholt bis durch einbeziehen eines weiteren Standortes keine Verbesserung des Zielfunktionswertes mehr erreicht werden kann.

Am besten lässt sich der Algorithmus wohl anhand eines Beispiels darstellen

Beispiel:¹⁰

Gegeben sei folgende Transportkostenmatrix mit i Depots und j Kunden. Die Depotfixkosten sind durch f_i beschrieben (Tab. 2).

i / j	1	2	3	4	5	6	7	f_i
1	1	2	10	9	6	7	3	5
2	2	9	0	7	3	6	10	7
3	7	6	1	5	3	10	5	5
4	6	5	10	2	6	3	6	6
5	6	4	6	3	7	2	6	5

Tab. 2: Beispiel Eröffnungsverfahren ADD: Transportkostenmatrix

Als erstes ist nun jener Standort zu ermitteln, der realisiert wird, wenn genau ein Depot eröffnet werden soll. Dazu errechnen wir die Zeilensummen der Transportkosten (c_i) und addieren die Fixkosten f_i .

i / j	1	2	3	4	5	6	7	f_i	c_i	$c_i + f_i$
1	1	2	10	9	6	7	3	5	38	43
2	2	9	0	7	3	6	10	7	37	44
3	7	6	1	5	3	10	5	5	37	42
4	6	5	10	2	6	3	6	6	38	44
<u>5</u>	6	4	6	3	7	2	6	5	34	<u>39</u>

Tab. 3: Beispiel Eröffnungsverfahren ADD: Iteration 1

¹⁰ Domschke, Drexl (1996), S.63 ff.

Standort 5 wird von I_0^{VI} nach I_1 verschoben, da er die geringsten Gesamtkosten $F = 39$ aufweist (Tab. 3).

In jeder nun folgenden Iteration wird die Transportkostensparnis ω_i errechnet, wenn ein Standort i endgültig einbezogen werden würde. Jener Standort für den gilt $\omega_i = \min$, wird endgültig einbezogen. Für den Fall dass $\omega_i < f_i$, kann der entsprechende Standort sofort endgültig verboten werden (verschieben von I_0^{VI} nach I_0).

i / j	1	2	3	4	5	6	7	ω_i	f_i
1	5	2			1		3	11	5
<u>2</u>	4		6		4			14	7
3			5		4		1	10	5
4				1	1			2	6

Tab. 4: Beispiel Eröffnungsverfahren ADD: Iteration 2

Nach Iteration 2 wird Standort 2 endgültig einbezogen, Standort 4 wird endgültig verboten. Nun ist $F = 39 - (\omega_2 - f_2) = 39 - (14 - 7) = 32$. Vgl. (Tab. 4).

i / j	1	2	3	4	5	6	7	ω_i	f_i
<u>1</u>	1	2					3	6	5
3							1	1	5

Tab. 5: Beispiel Eröffnungsverfahren ADD: Iteration 3

Nach Iteration 3 wird Standort 1 endgültig einbezogen, Standort 3 wird endgültig verboten. Nun ist $F = 32 - (\omega_1 - f_1) = 32 - (6 - 5) = 31$. Vgl. (Tab. 5).

Die Lösung des Beispiels stellt sich also wie folgt dar:

$$I_0 = \{3,4\} \quad I_1 = \{1,2,5\}$$

i / j	1	2	3	4	5	6	7	f_i
1	1	2	10	9	6	7	3	5
2	2	9	0	7	3	6	10	7
3	7	6	4	5	3	10	5	5
4	6	5	10	2	6	3	6	6
5	6	4	6	3	7	2	6	5

Tab. 6: Beispiel Eröffnungsverfahren ADD: Lösung

Lager 1 beliefert also Kunden $\{1,2,7\}$, Lager 2 Kunden $\{3,5\}$ und Lager 5 Kunden $\{4,6\}$ bei Gesamtkosten von $F = 31$.

3.3.2 Eröffnungsverfahren DROP

Im Gegensatz zum Eröffnungsverfahren ADD geht man beim DROP-Algorithmus davon aus, dass zunächst alle möglichen Standorte vorläufig erlaubt sind ($I_0^{vl} = 0, I_1^{vl} = I$) wobei mit jeder Iteration jene Standorte endgültig verboten werden, die die Gesamtkosten F erhöhen. Vorgestellt wurde der Algorithmus in *Daskin (1995)*.

Auch der DROP-Algorithmus soll wieder anhand eines Beispiels aus *Domschke und Drechsl (1996)* vorgestellt werden.

Beispiel:¹¹

Ausgegangen wird vom gleichen Beispiel wie beim ADD-Algorithmus (siehe Tab. 1). Diese Tabelle wird um die Transportkostenerhöhung δ_i sowie um vier zusätzliche Zeilen erweitert. In Zeile $m+1$ und $m+2$ wird das kleinste bzw. zweitkleinste Kostenelement jeder Spalte festgehalten, während in Zeile $m+3$ und $m+4$ die entsprechende Zeile gespeichert wird, in der die jeweiligen Transportkosten stehen.

Die Transportkostenerhöhung δ_i errechnet sich dabei aus „der Summe der Differenzen zwischen kleinstem und zweitkleinstem Kostenelement jener Spalten, wo die Zeile $i = h_i$ das kleinste Kostenelement enthält.“¹²

¹¹ Aus Domschke, Drechsl (1996), S. 63ff.

i / j	1	2	3	4	5	6	7	δ_i	f_i
1	<u>1</u>	<u>2</u>	10	9	6	7	<u>3</u>	5	5
2	<u>2</u>	9	<u>0</u>	7	<u>3</u>	6	10	1	7
3	7	6	<u>1</u>	5	3	10	<u>5</u>	0	5
4	6	5	10	<u>2</u>	<u>6</u>	<u>3</u>	6	1	6
5	6	<u>4</u>	6	<u>3</u>	7	<u>2</u>	6	1	5
c_{h1j}	1	2	0	2	3	2	3		
c_{h2j}	2	4	1	3	3	3	5		
h_1	1	1	2	4	2	5	1		
h_2	2	5	3	5	3	4	3		

Tab. 7: Beispiel Eröffnungsverfahren DROP: Iteration 1

Ein Standort kann endgültig einbezogen werden, wenn gilt $\delta_i \geq f_i$. Sind die – durch das Verbot des Standortes – ersparten Fixkosten höher als eine eventuelle Transportkostenerhöhung bei erlauben eines Standortes, so kann er endgültig verboten werden. Daraus folgt, dass in unserem Beispiel Standort 1 endgültig einbezogen und Standort 2 endgültig verboten wird (Tab. 7).

i / j	1	2	3	4	5	6	7	δ_i	f_i
1	<u>1</u>	<u>2</u>	10	9	6	7	<u>3</u>	-	-
3	7	6	<u>1</u>	5	<u>3</u>	10	<u>5</u>	8	5
4	6	5	10	<u>2</u>	<u>6</u>	<u>3</u>	6	1	6
5	<u>6</u>	<u>4</u>	<u>6</u>	<u>3</u>	7	<u>2</u>	6	1	5
c_{h1j}	1	2	1	2	3	2	3		
c_{h2j}	6	4	6	3	6	3	5		
h_1	1	1	3	4	3	5	1		
h_2	5	5	5	5	4	4	3		

Tab. 8: Beispiel Eröffnungsverfahren DROP: Iteration 2

Da Standort 1 nicht mehr gestrichen werden darf, muss δ_i nicht berechnet werden. Der verbotene Standort 2 wurde eliminiert.

¹² Hartl, Dörner: Operations Management, Skriptum, S. 24

In Iteration 2 wird nun Standort 3 endgültig einbezogen, während Standort 4 endgültig verboten wird (Tab. 8).

i / j	1	2	3	4	5	6	7	δ_i	f_i
1	<u>1</u>	<u>2</u>	10	9	<u>6</u>	<u>7</u>	<u>3</u>	-	-
3	7	6	<u>1</u>	<u>5</u>	<u>3</u>	10	<u>5</u>	-	-
5	<u>6</u>	<u>4</u>	<u>6</u>	<u>3</u>	7	<u>2</u>	6	7	5
c_{h1j}	1	2	1	3	3	2	3		
c_{h2j}	6	4	6	5	6	7	5		
h_1	1	1	3	5	3	5	1		
h_2	5	5	5	3	1	1	3		

Tab. 9: Beispiel Eröffnungsverfahren DROP: Lösung

In Tab. 9 ist die Lösung des Beispiels dargestellt.

$$I_0 = \{2,4\} \quad I_1 = \{1,3,5\}$$

Depot 1 beliefert Kunden $\{1,2,7\}$ Depot 3 Kunden $\{3,5\}$ und Depot 5 Kunden $\{4,6\}$.

$$F = f_1 + c_{11} + c_{12} + c_{17} + f_3 + c_{33} + c_{35} + f_5 + c_{54} + c_{56} = 30$$

3.3.3 Verbesserungsverfahren

Verbesserungsverfahren im Bereich der Standortplanung gehen in der Regel von einer, durch die Mengen I_0 der endgültig verbotenen - bzw. I_1 der endgültig einbezogenen Standorte, definierten Lösung aus. Sie sollen eine Verbesserung der ursprünglichen, durch ein Eröffnungsverfahren erzielte, Lösung bringen indem zum Beispiel Vertauschungen durchgeführt werden. Eine Möglichkeit hierfür ist, pro Iteration einen bislang erlaubten Standort gegen einen bislang verbotenen Standort in der Nachbarschaft auszutauschen. Ergibt sich dadurch eine Verbesserung des Zielfunktionswertes, wird diese gespeichert. Technisch entspricht die Eliminierung eines Standortes aus der Lösung einer DROP-Iteration, während das Hinzufügen einer ADD-Iteration entspricht.

Verbesserungsverfahren die nach diesen Prinzipien arbeiten sind unter anderem Simulated Annealing, Genetic Algorithms oder Tabu Search. Eine wichtige, nicht nach dem Prinzip der Vertauschung arbeitende Heuristik ist die Lagrange-Heuristik.

Ausführliche Beschreibung dieser komplexen, weiterführenden Heuristiken liefern unter anderem *Alves, Almeida (1992)* zu Simulated Annealing, *Michel, Van Hentenryck (2004)* und *Sun (2006)* zu Tabu Search, *Kratka, Tosic, Filipovic, Ljubic (2001)* zu Genetic Algorithms sowie *Beasley (1993)* zu Lagrange Heuristiken.

Einen empirischen Vergleich zwischen Tabu Search, Simulated Annealing und Genetic Algorithms bei Standortproblemen liefert *Arostegui, Kadipasaoglu, Khumawala (2006)*.

3.4 exakte Lösungsverfahren: Branch-and-Bound Verfahren

Neben den oben beschriebenen heuristischen Lösungsansätzen existiert auch noch eine Reihe von Verfahren, mit denen WLPs exakt gelöst werden können. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um sogenannte Branch-and-Bound (kurz B&B) Verfahren.¹³

B&B Verfahren wurden erstmals in den 1960er Jahren vorgestellt. Federführend waren hierbei *Land, Doig (1960)* und *Dakin (1965)*.

Grundprinzip der B&B Verfahren ist die Aufgliederung des ursprünglichen Problems in disjunkte Teilprobleme (Branching) und die anschließende separate Optimierung jedes Teilproblems unter vorzeitigem ausklammern suboptimaler Lösungen (Bounding). Grafisch kann der Branch Teil des Verfahrens als Entscheidungsbaum dargestellt werden (siehe Abb. 1).

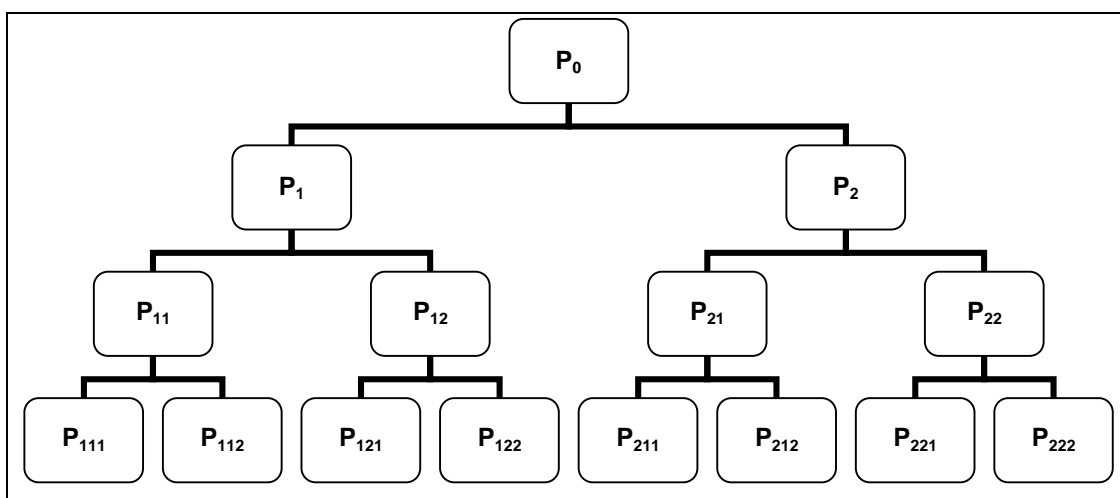


Abb. 1: Beispielhafter Entscheidungsbaum des B&B Verfahrens

¹³ Vgl. Domschke, Drexl (1996), S. 78

In der Folge wird jedes Sub-Problem einzeln optimiert. Ist die zu erwartende Optimallösung des Teilproblems schlechter als die beste bisher bekannte Lösung, kann es aus den weiteren Betrachtungen ausgeklammert werden. Dazu wird die temporäre Optimallösung als obere Schranke festgelegt, mit der die Lösung des Sub-Problems verglichen wird.

Dieses Vorgehen ermöglicht es, durch die Aussparung ganzer Äste des Entscheidungsbaumes, den Rechenaufwand zu reduzieren.

Zur exakten Lösung von unkapazitierten, einstufigen WLPs – mit denen sich diese Arbeit beschäftigt – hat sich das DUALLOC Verfahren von *Erlenkotter (1975)* bewährt. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens von Erlenkotter findet sich in *Domschke, Drexl (1996), S. 82ff.*

Körkel (1989) gelang es, das Verfahren von Erlenkotter durch eine primal-dual-adjustment-Methode zu verbessern und zu beschleunigen. Bis heute ist die Kombination der Verfahren von Erlenkotter und Körkel als eine der effizientesten Lösungsmethoden für unkapazitierte WLPs angesehen. Einen Versuch die Algorithmen weiter zu beschleunigen liefern *Janáček, Buzna (2008)*.

Kapitel 4: Standortplanung in der Praxis

4.1 Problembeschreibung

Diese Diplomarbeit wurde von einem Unternehmen aus der Privatwirtschaft angeregt.

Das Unternehmen äußerte den strikten Wunsch aus wettbewerbsstrategischen Gründen anonym zu bleiben, weshalb diesbezüglich auch keine weiteren Angaben gemacht werden können. Es sei nur erwähnt, dass es sich um ein Unternehmen der Konsumgüterindustrie handelt.

Zum Eintritt in den österreichischen Markt und dem damit einhergehendem Aufbau eines Distributionsnetzwerkes sollte eine unbestimmte Anzahl an Lagerstandorten eröffnet werden. Die vom Wirtschaftspartner übermittelten Rohdaten beinhalteten die Adressen und Koordinaten der Kunden, deren Nachfrage pro Monat, die angedachte Lieferfrequenz sowie Zeitfenster innerhalb deren eine Belieferung möglich ist. Als Transportkostenmatrix wurde eine, ebenfalls zur Verfügung gestellte, Distanzmatrix, welche die Distanzen zwischen den einzelnen Kundenstandorten in Fahrminuten wiedergibt, herangezogen. Mögliche Depotstandorte sind alle gegebenen Kundenstandorte, die Depots unterliegen keinen Kapazitätsbeschränkungen. Weiters wurden keine konkreten Fixkosten für die Depoteröffnung angegeben.

Folgende Fragestellungen waren zu klären:

- Wie viele Lagerstandorte sind für die gegebenen Kunden wirtschaftlich sinnvoll?
- Wie soll sich die Verteilung über Österreich gestalten?
- Wo genau sind Lagerstandorte zu empfehlen?

4.2 Rohdaten

Wie schon in Kapitel 4.1 erwähnt, wurden von unserem Wirtschaftspartner folgende Rohdaten zur Verfügung gestellt:

- Kundenstandortdaten von ca. 4500 Kunden bestehend aus:
 - Kundennummer
 - Straße
 - Postleitzahl
 - Ort
 - Anfahrt möglich von
 - Anfahrt möglich bis
 - Bedarf pro Monat in Kartons
 - Anfahrtsfrequenz

- Kundenkoordinaten zu den Standorten im Lambert-Koordinaten-Format

- Matrix über die Distanzen zwischen ca. 4500 Kunden in Fahrminuten

Die Kundendaten mussten noch insoweit aufbereitet werden, sodass jeder Kunde genau einmal beliefert werden soll und keine negativen Bedarfe ausgewiesen werden.

4.3 geografische Verteilung

Als ersten Arbeitsschritt sollte ein Überblick über die geografische Verteilung der ca. 4500 Kundenstandorte in Österreich geschaffen werden. Abb. 2 zeigt die Verteilung der Kunden in Österreich.

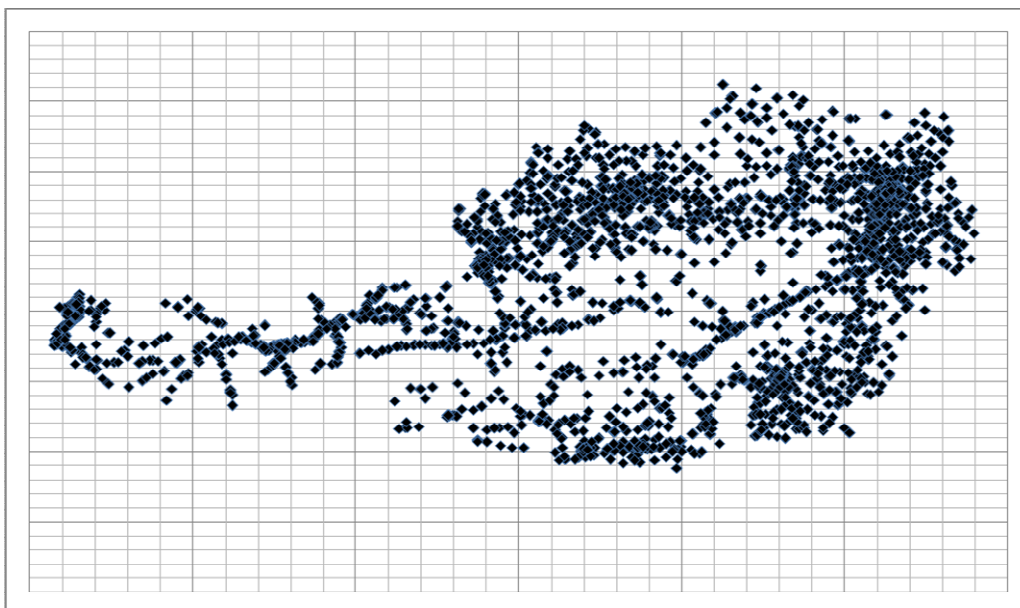


Abb. 2: Geografische Verteilung der ca. 4500 Kundenstandorte

Auffällig ist hier die starke Konzentration im Norden und Osten Österreichs sowie in den Ballungsräumen – vor allem im Großraum Wien, Salzburg sowie Linz-Wels und Graz.

4.4 Berechnungen und Erkenntnisse

In weiterer Folge soll das Standortproblem sowohl als p-Median Problem, als auch als WLP gelöst werden. Hierzu wird auf die Optimierungssoftware ILOG OPL Development Studio IDE 6.2 – im Speziellen auf ILOG CPLEX 11.2.0 – zurückgegriffen.

4.4.1 ILOG OPL Development Studio

Sämtliche Berechnungen des Standortproblems wurden mit ILOG CPLEX 11.2.0 aus dem Softwarepaket ILOG OPL Development Studio IDE 6.2 durchgeführt.

ILOG OPL Studio ist eine grafische Benutzeroberfläche zur Entwicklung und Lösung verschiedenster Optimierungsprobleme, darunter die lineare Programmierung, ganzzahlig lineare Programmierung und Reihenfolgeplanungsprobleme, auf Basis der algebraischen Programmiersprache OPL.¹⁴

Von einer algebraischen Programmiersprache spricht man, wenn ein Programm aus algebraischen Formeln und Ausdrücken besteht; dazu gehört auch, dass die Regeln der Algebra, wie etwa das Kommutativ- oder das Distributivgesetz etc., Anwendung finden. Sie steht im Gegensatz zur imperativen Programmierung, bei der Anweisungen nacheinander abgearbeitet werden.¹⁵

Die Grundidee der OPL ist die Trennung von Modellen und Datensätzen. Erstere werden in Modell-Dateien (*.mod), zweitere in Daten-Dateien (*.dat) gespeichert, die gemeinsam wiederum unter einer Projekt-Datei laufen (*.prj). Dadurch wird eine flexible Arbeitsweise ermöglicht, sodass ohne Abänderung des Modells eine Vielzahl von Datensätzen berechnet werden können. Eine Modell-Datei setzt sich aus

¹⁴ Vgl. Heisig, Minner (1999); S. 419

¹⁵ Vgl. Lederer (2007); S. 25

der Bezeichnung der notwendigen Datenstruktur, Art und Bereich der Variablen, Zielfunktion und Nebenbedingungen zusammen.¹⁶

Die Modell- und Datendateien, die im Zuge dieser Arbeit Anwendung fanden, finden sich im Anhang.

4.4.2 Berechnung des p-Median Problems und Erkenntnisse

Zunächst sollte die Standortplanung mittels p-Median Modell durchgeführt werden. Dazu wurde in ILOG CPLEX ein p-Median.mod-file implementiert (siehe Anhang A) und für 4300 Kunden – bedingt durch die Größe der Distanzmatrix – wurden die entsprechenden .dat-files erstellt.

Der Erste Rechendurchlauf mit ca. 4500 Kunden und $P=1$ wurde auf einem Intel Core Duo Prozessor mit 2,53 GHz, 4GB RAM Arbeitsspeicher und einem Windows 32-bit Betriebssystem in ILOG CPLEX durchgeführt. Schon nach kurzer Zeit wurde der Durchlauf mit der Ausgabe: „Error1001: Out of memory“ abgebrochen. Nach diversen Durchläufen mit unterschiedlicher Anzahl an Kundenstandorten ließ sich die Rechenkapazität auf ca. 450 Kunden begrenzen. Dazu mussten nur die jeweiligen data-files angepasst bzw. eingelesen werden.

Um das Problem zu lösen, gingen wir dazu über, auf einen Clusterserver der Universität Wien auszuweichen. Da der Zeitplan allerdings ausgesprochen eng gesteckt war, einigten wir uns darauf in einem ersten Schritt die Zielfunktionswerte eines p-Median Problems mit vorerst 1000 Kunden zu berechnen. Dieses Vorgehen erschien uns als sinnvoll und zulässig, da die Überprüfung der 1000 Standorte eine repräsentative Verteilung über Österreich ergab.

Ziel dieses Arbeitsschrittes sollte sein, eine erste Aussage über die voraussichtlich zu empfehlende Anzahl an zu eröffnenden Standorten zu treffen. Im Konkreten berechneten wir das p-Median Problem mit $P=1, 2, 3, 4, 5, 7, 10$ und 15 Standorten (siehe Tab. 10 und Abb. 3).

P	1	2	3	4	5	7	10	15
Objective	979.067	507.726	354.496	297.604	242.270	179.446	152.347	121.187

Tab. 10: Zielfunktionswerte des p-Median Modells mit 1000 Kunden

¹⁶ Vgl. Heisig, Minner (1999); S. 419

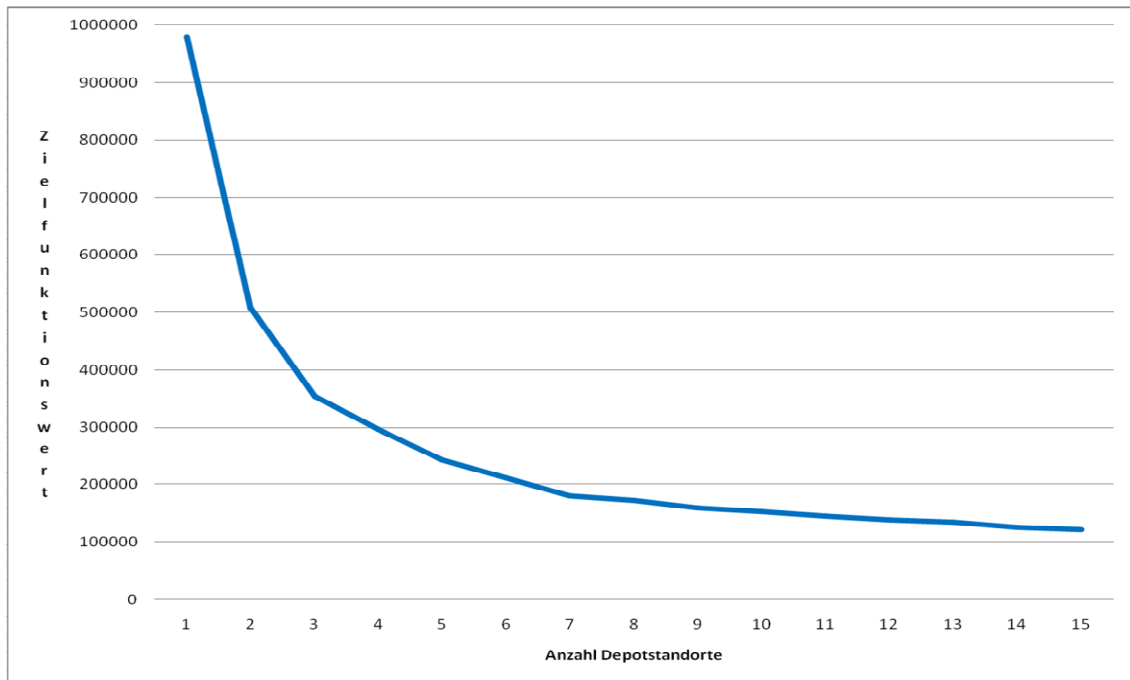


Abb. 3: Zielfunktionswerte im Verhältnis zur Anzahl der eröffneten Standorte

In Abb. 3 sind die errechneten Zielfunktionswerte im Verhältnis zur Anzahl der zu eröffnenden Lagerstandorte dargestellt. Es wird ersichtlich, dass bis zu einer Anzahl von 5 Standorten eine starke Abnahme der Zielfunktionswerte zu erkennen ist. Über 7 Standorten ist die Reduktion bei Einführung eines weiteren Standortes nur mehr gering. Aus diesen Überlegungen lässt sich ableiten, dass sich, vor allem bei entsprechend geringen Depotfixkosten, fünf bis sieben Depots als sinnvoll erweisen werden.

In der Zwischenzeit wurden alle relevanten Rohdaten entsprechend aufbereitet, sodass auf Basis der erhaltenen Erkenntnisse der zur Berechnung herangezogene Datensatz wieder erhöht werden sollte. Allerdings reichte selbst der Arbeitsspeicher auf dem verfügbaren Clusterserver nicht aus, um eine exakte Berechnung mit allen in der Distanzmatrix enthaltenen Kunden durchzuführen. So einigten wir uns darauf, die Berechnung mit den 3500 wichtigsten Kunden, definiert durch die monatlichen Bedarfe, durchzuführen.

Hierfür wurden der Kundendatensatz sowie die Distanzmatrix auf 3500 Kunden reduziert und die entsprechenden CPLEX-data-files erstellt. Siehe dazu Beispielfhaft einen Auszug aus p-Median_3500_5 in Anhang A.

Wie Abb. 4 zeigt, ist auch mit 3500 Kunden eine, im Vergleich zur Gesamtkundenzahl, aussagekräftige Verteilung gegeben.

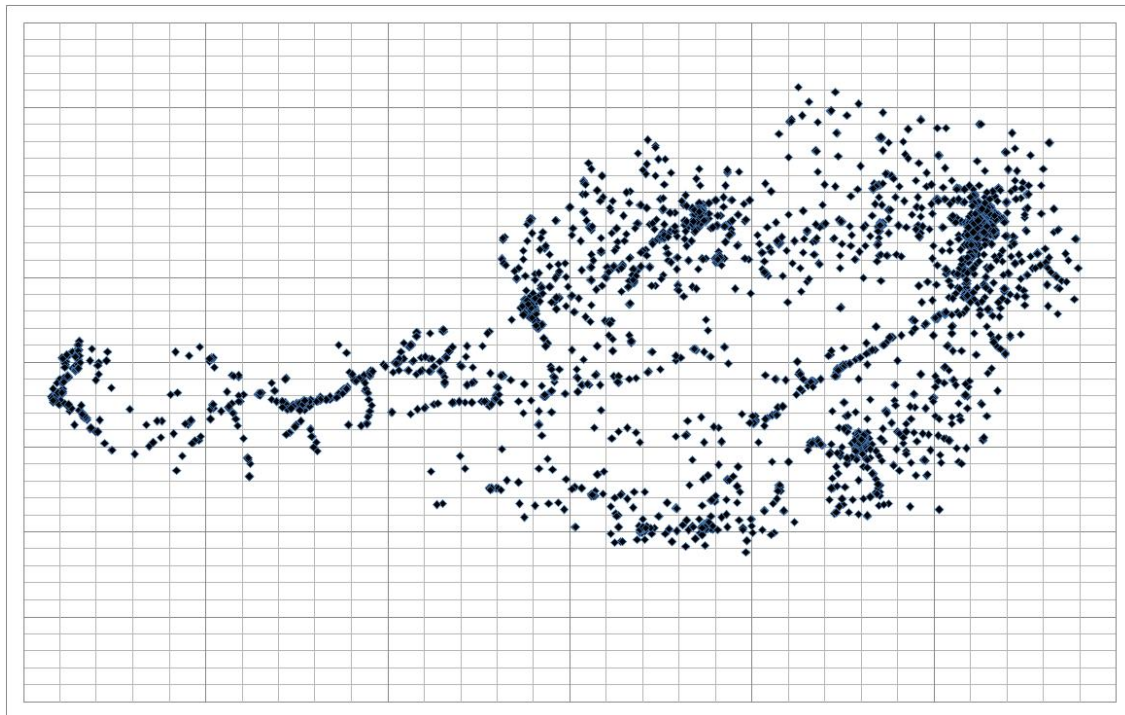


Abb. 4: Geografische Verteilung der 3500 wichtigsten Kunden

Dieser nächste Schritt soll zur ersten Bestimmung der vorzuschlagenden Standorte dienen. Dazu wurde das p-Median Problem für $P = 5, 6,$ und 7 Standorte durchgerechnet. Zusätzlich dazu wurde die gleiche Serie mit Bedarf $b_j = 1$ gerechnet, um etwaige Unterschiede aufzuzeigen, wenn der Bedarf standardisiert ist und somit ausschließlich die Transportkosten, vulgo die Entfernung in Fahrtminuten, in die Berechnung einfließt. In einer dritten Rechenserie für selbige Standortzahlen wurde der Bedarf mit einem Faktor L gewichtet, welcher die Lieferfrequenz widerspiegelte. Dies sollte dazu dienen, herauszufinden inwieweit eine häufigere Anfahrt innerhalb eines Monats die Standortwahl beeinflussen würde, wobei gilt:

- $L = 1$ für Lieferung einmal monatlich
- $L = 2$ für 14-tägige Lieferung
- $L = 4$ für wöchentliche Lieferung

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgte in Form einer Binärzahlenmatrix, wobei für jeden möglichen Depotstandort, also für jede einzelne Kundennummer, entweder 0 – falls hier kein Depot eröffnet werden sollte – oder 1 – im Fall dass an entsprechender Stelle ein Depot eröffnet werden sollte – ausgegeben wurde. Gleiches Prinzip galt

auch bei der Berechnung und Ausgabe der Depotzuordnungen zu den einzelnen Kundenstandorten.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tab. 11 und Abb. 5 bis Abb. 7 dargestellt.

	normal		1 demand		gewichtet	
	Standort	Objective	Standort	Objective	Standort	Objective
5	406132 Wals- Siezenheim	1.405.930	433706 Wien, 5	2.979.006	406132 Wals- Siezenheim	150.967
	433706 Wien, 5		471375 Innsbruck		433706 Wien, 5	
	470112 Imst		545616 Pfarrwerfen		470112 Imst	
	554113 Seiersberg/Graz		554113 Seiersberg/Graz		554113 Seiersberg/Graz	
	561902 Ansfelden		561902 Ansfelden		561902 Ansfelden	
6	278986 Steyr	1.198.098	244830 Salzburg	2.530.800	278986 Steyr	129.791
	433706 Wien, 5		433706 Wien, 5		433706 Wien, 5	
	470112 Imst		470807 Telfs in Tirol		470112 Imst	
	532358 Graz		477661 Wien, 4		532358 Graz	
	542324 Salzburg		532358 Graz		406132 Wals- Siezenheim	
	561902 Ansfelden		561902 Ansfelden		561902 Ansfelden	
7	115378 Dornbirn	997.668	372706 Innsbruck	2.112.746	115378 Dornbirn	111.280
	278986 Steyr		433706 Wien, 5		278986 Steyr	
	372706 Innsbruck		476663 Wien, 12		372706 Innsbruck	
	433706 Wien, 5		477661 Wien, 4		433706 Wien, 5	
	476663 Wien, 12		532358 Graz		476663 Wien, 12	
	532358 Graz		537399 Hohenems		532358 Graz	
	561902 Ansfelden		561902 Ansfelden		561902 Ansfelden	

Tab. 11: Ergebnisse der Berechnungen des p-Median Modells mit 3500 Kunden

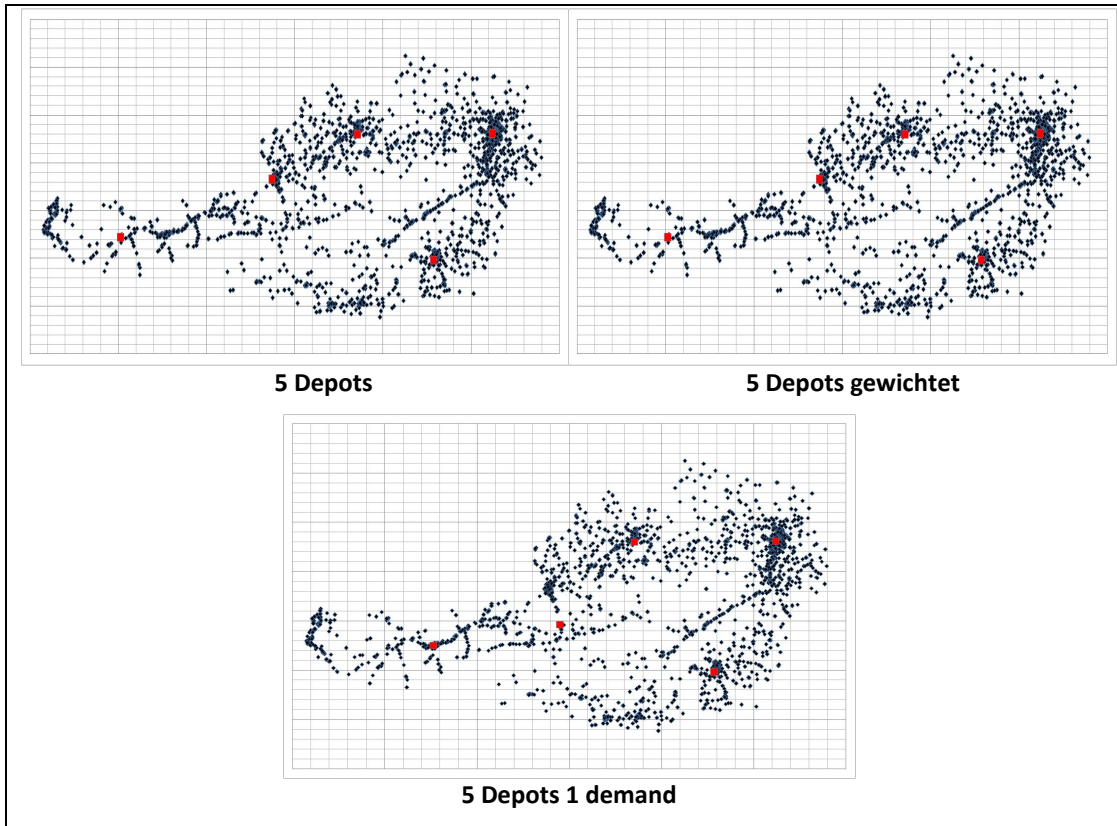


Abb. 5: Zu öffnende Depots nach dem p-Median Modell mit $P=5$

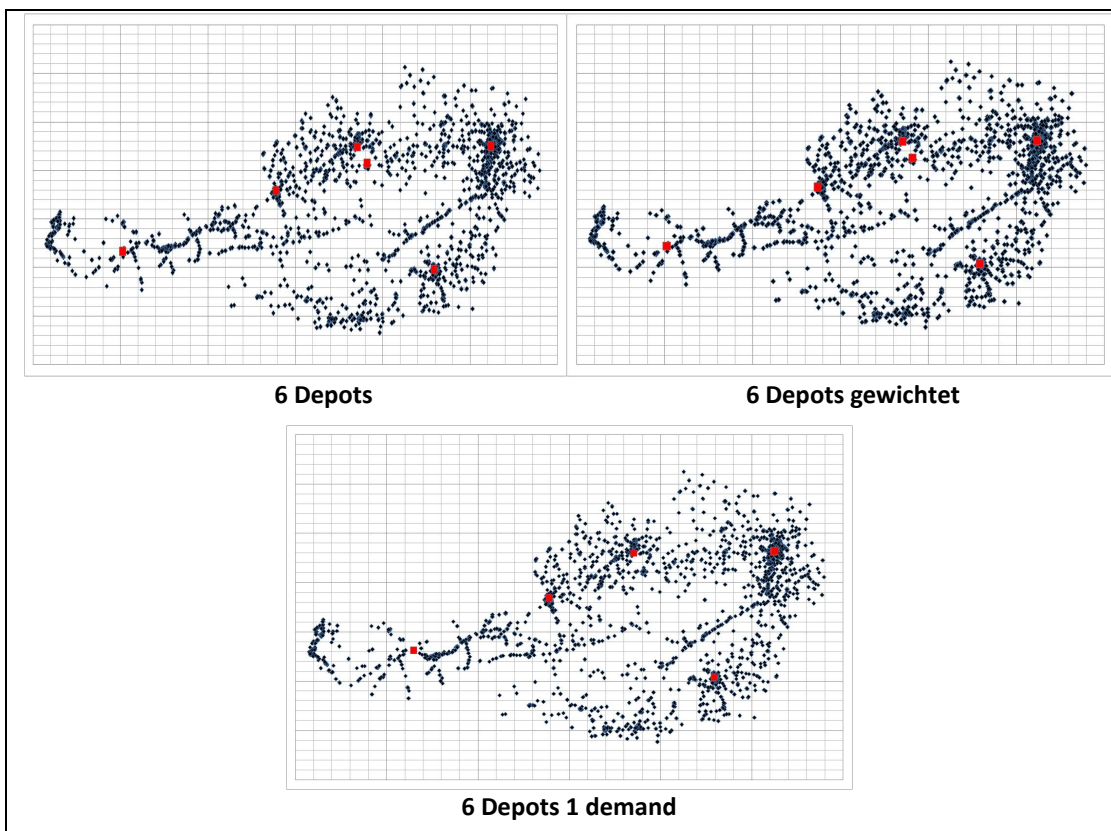


Abb. 6: Zu öffnende Depots nach dem p-Median Modell mit $P=6$

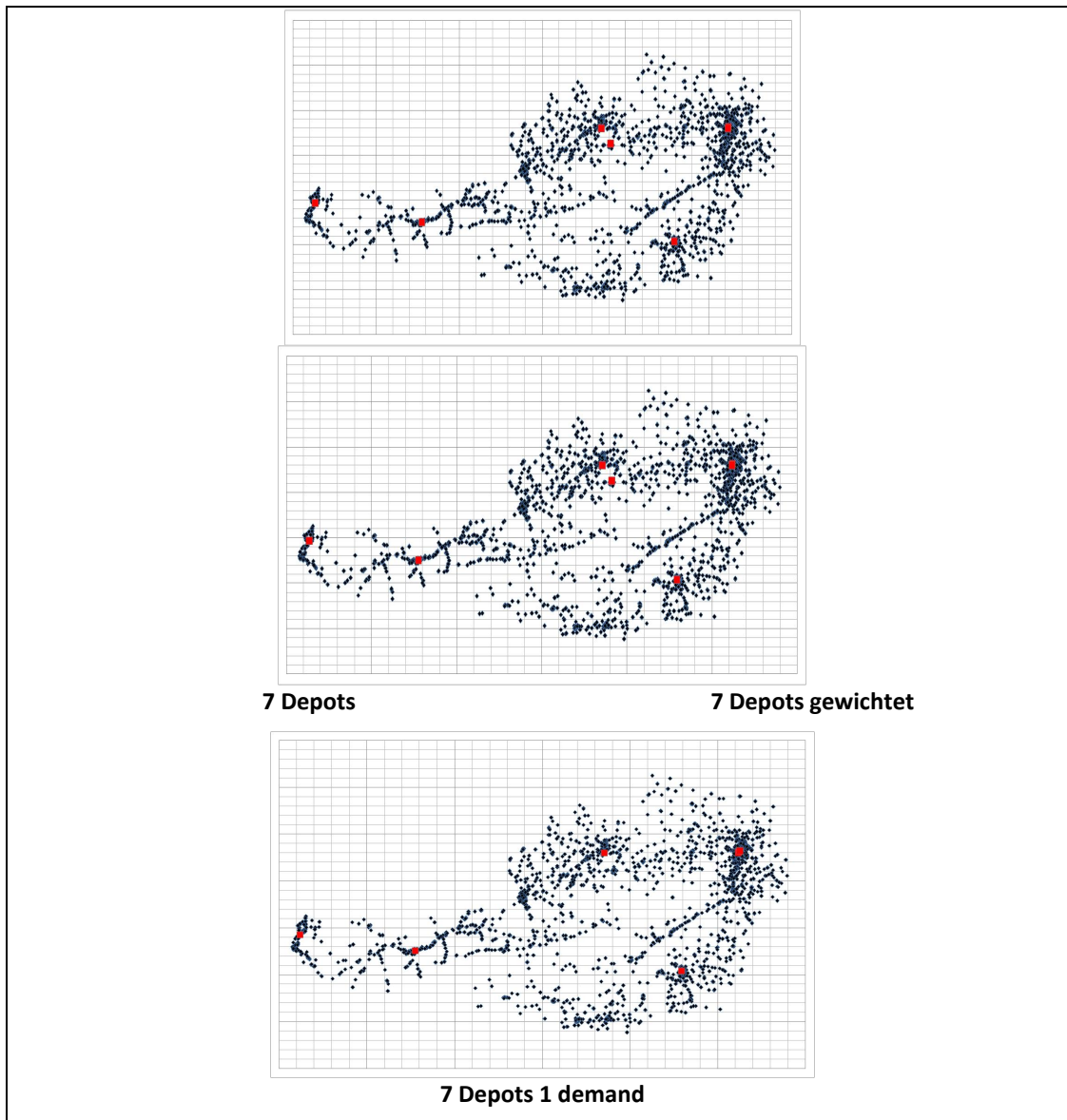


Abb. 7: Zu öffnende Depots nach dem p-Median Modell mit $P=7$

Erkenntnisse:

- Über den Großteil der Berechnungsserie hinweg lassen sich Wien, Großraum Linz, Graz, Salzburg und das Inntal als „Basisstandorte“ erkennen, die sich im 6 und 7 Depotfall nur geringfügig ändern bzw. um einzelne Standorte innerhalb dieser Großräume erweitert werden.
- Erst im 7. Depot Fall wird ein Standort in Vorarlberg vorgeschlagen. Dieser soll auf Kosten des Standortes Salzburg entstehen, der durch einen zweiten Standort im Großraum Linz-Wels kompensiert wird.

- Die Gewichtung mit den Lieferfrequenzen zieht kaum – in den meisten Fällen sogar überhaupt keine – Änderungen nach sich. Das heißt, die Häufigkeit der Anfahrt scheint im Verhältnis zu den zurückzulegenden Strecken keine Auswirkungen auf die Standortwahl zu haben.
- Wird der Bedarfswert b_j standardisiert, lassen sich geringe Abweichungen erkennen, die sich jedoch erst ab 6 Depots als relevant erweisen. Im Vergleich zur normalen Berechnung tendieren die – vom 5 Depot Fall aus betrachtet zusätzlichen – 6. bzw. 7. Standorte gen Großraum Wien.
- Aufgrund der Tatsache dass den einzelnen Lagerstandorten keine Kapazitätsbeschränkungen auferlegt werden, ist der 6 und 7 Depot Fall, bei dem zusätzlich zu bestehenden Standorten in Wien und im Großraum Linz jeweils ein zusätzliches Depot eröffnet werden sollen, zu hinterfragen.
- Die Abnahme der Zielfunktionswerte bei Öffnung eines zusätzlichen Standortes ist wie erwartet in allen berechneten Fällen beinahe konstant. Es ist anzunehmen, dass der 5 Depot Fall jedenfalls zu präferieren ist, sollten die Fixkosten eines Depots 200 000 Kosteneinheiten übersteigen.
- Die reinen Transportkosten auf Basis der Fahrtzeiten machen rund 10% des gesamten Zielfunktionswertes aus (Vergleich p-Median Standard zu p-Median gewichtet).

4.4.3 Berechnung des WLP und Erkenntnisse

Den WLP Berechnungen zugrunde liegt dasselbe Datenmaterial, welches schon im p-Median Modell Anwendung fand. Es musste nur noch ein CPLEX-model-file (siehe Anhang B) für das WLP geschrieben und die entsprechenden data-files erstellt werden, die die jeweiligen Fixkosten für den Berechnungsdurchlauf angeben. Ein Beispielhafter Auszug aus WLPunkap_3500_f100 findet sich in Anhang B.

Insofern wurde das WLP ebenfalls mit 3500 Kunden berechnet. Hinsichtlich der, nicht konkret vorgegebenen, Fixkosten entschieden wir uns, jeweils eine Rechenreihe mit den Fixkostenwerten $f_i = 100.000, 200.000$ und 300.000 zu

generieren. Des Weiteren wurden zu Testzwecken dieselben Abänderungen - Gewichtung mit der Lieferfrequenz sowie standardisierte Bedarfswerte - wie beim p-Median Problem vorgenommen. Die Fixkostenwerte für die Eröffnung eines Depots beruhen auf Schätzungen, da uns hierfür kein konkreter Wert vom Wirtschaftspartner genannt werden konnte.

Die Berechnungen ergaben, dass bis $f_i = 200.000$ sieben Standorte als optimal gelten, wobei die Standorte exakt mit jenen aus dem p-Median Modell mit $P = 7$ übereinstimmen.

Erst darüber kommt es zu einer Reduktion der Depotzahl, wobei bei $f_i = 300.000$ schon nur mehr vier Standorte vorgeschlagen werden (vgl. Tab. 12 und Abb. 8).

	f = 100.000	f = 200.000	f = 300.000
Standorte	115378 Dornbirn	115378 Dornbirn	246710 St. Martin am Tennengebirge
	278986 Steyr	278986 Steyr	433709 Wien, 5
	372706 Innsbruck	372706 Innsbruck	471375 Innsbruck
	433706 Wien, 5	433706 Wien, 5	554113 Seiersberg b. Graz
	476663 Wien, 12	476663 Wien, 12	
	532358 Graz	532358 Graz	
	561902 Ansfelden	561902 Ansfelden	

Tab. 12: Ergebnisse der Berechnungen des WLP mit 3500 Kunden

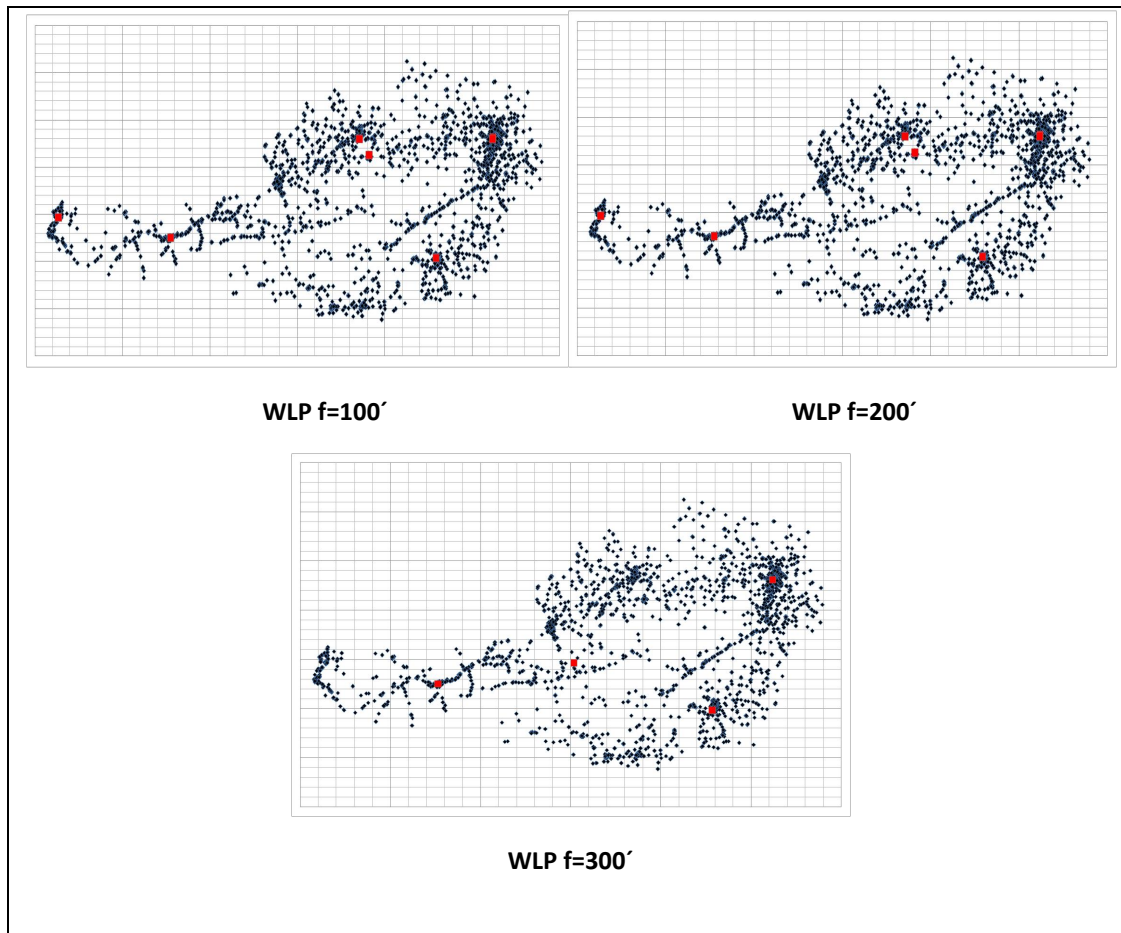


Abb. 8: Zu öffnende Depots nach dem WLP Modell

Gewichtet man den Bedarf mit der Anfahrtshäufigkeit, ergeben sich auch mit $f_i = 300.000$ noch keine Veränderungen zum gewichteten $f_i = 100.000$ -Fall. Es werden jeweils jene sieben Standorte vorgeschlagen, die auch für das normale WLP $f_i = 100.000$ als Lösung gelten. Dies lässt sich durch die, auf Grund der Gewichtung, im Verhältnis zu den Fixkosten hohen Transportkosten erklären. Eine Reduktion der Depotstandorte würde erst bei höheren Fixkosten eintreten.

Standardisiert man den Bedarf mit $b_j = 1$, werden aufgrund der im Verhältnis zu den Transportkosten hohen Fixkosten nur entsprechend wenige Standorte vorgeschlagen. Vergleiche hierzu Tab. 13 und Abb. 9.

	f = 100.000	f = 200.000	f = 300.000
Standorte	257691 Wien, 10	257691 Wien, 10	551259 Amstetten
	406132 Wals-Siezenheim	406132 Wals-Siezenheim	

Tab. 13: Ergebnisse der Berechnungen des WLP mit 3500 Kunden und $b_j = 1$

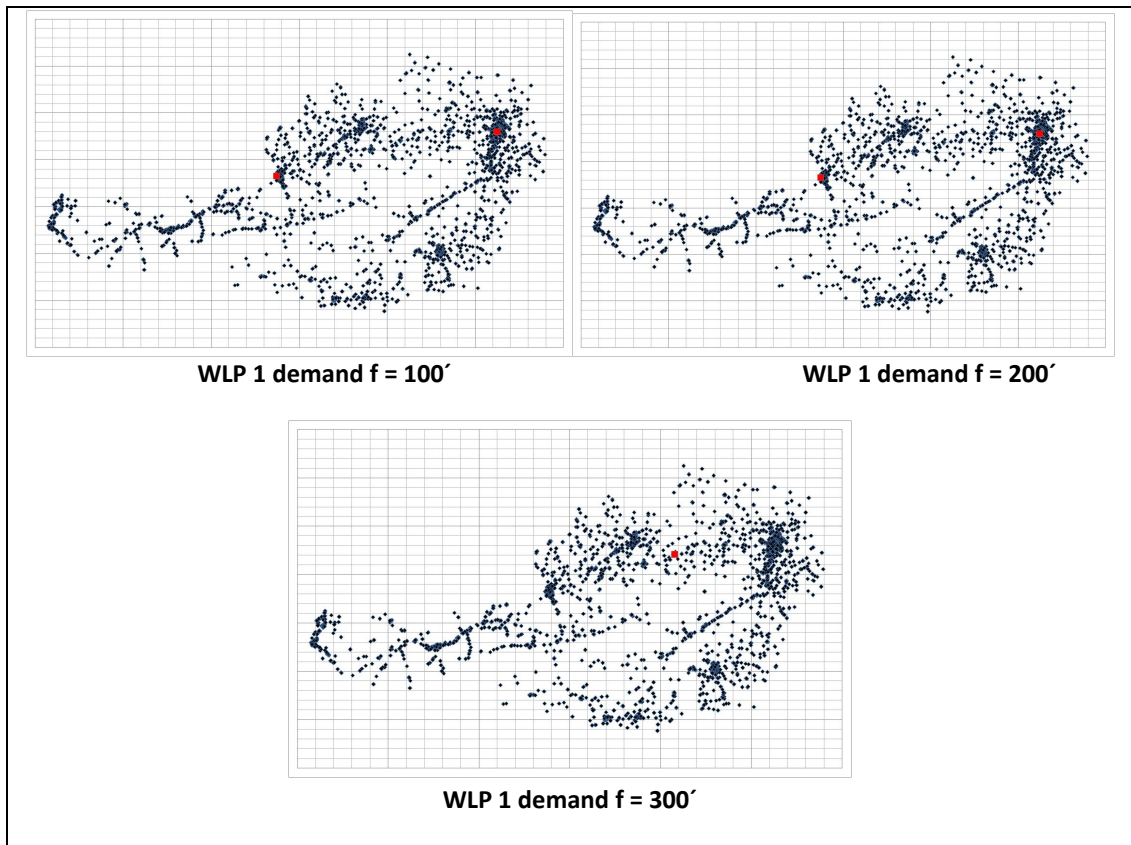


Abb. 9: Zu öffnende Depots nach dem WLP Modell mit $b_j = 1$

Auch in diesen Fällen, bei denen der Nachfragewert ausgeschaltet ist und es somit ausschließlich auf die Transportkosten ankommt, lässt sich – im Konkreten bei Fixkosten bis 200.000 – wieder die Tendenz zu den schon bekannten Standorten Wien und Wals-Siezenheim erkennen. Bei höheren Fixkosten bei denen nur noch ein Standort als Lösung errechnet wurde, wird das – auf die Distanzen bezogen – relativ zentrale Amstetten vorgeschlagen.

4.5 Zusammenfassung und Probleme

Die anfänglich größten Probleme ergaben sich aus den fehlerhaften bzw. unzureichend verarbeiteten Rohdaten. Erst nach deren Aufbereitung konnte mit ersten Rechen-versuchen begonnen werden. Schnell stellte sich allerdings das nächste Problem ein: die extrem hohe Rechenkapazität, die benötigt wurde, um ein derartiges Problem mit der uns vorgegebenen hohen Anzahl an Kundenstandorten zu bewältigen. Wir hatten somit keine andere Wahl, als den Datensatz auf die 3500 wichtigsten Kunden zu reduzieren.

Auf Grund der nicht ausreichend definierten Fixkosten für die Eröffnung von Depots, kann das WLP nur als Spielart bzw. zur Bestätigung der Ergebnisse aus dem p-Median Modell gesehen werden. Es wird jedenfalls die in Kap. 4.4.2 getroffene Annahme bestärkt, dass sich die Depotanzahl bei Fixkosten von über 200.000 reduziert. Außerdem stimmen die Muster der geografischen Verteilung in beiden Modellen überein.

Die wertvolleren Erkenntnisse lassen sich aus dem p-Median Modell ziehen. So lässt sich die Anzahl der zu favorisierenden Depots auf fünf bis sieben eingrenzen, wobei speziell aus der Doppelbesetzung einiger Regionen bei sechs und sieben Standorten die Sinnhaftigkeit von mehr als fünf Depots zu hinterfragen ist. Dies ist vor allem so lange der Fall, wie keine Kapazitätsbeschränkungen für die einzelnen Lager angenommen werden.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde, nach Absprache mit dem Wirtschaftspartner, die Anzahl der zu eröffnenden Depots auf fünf festgelegt. Von unserer Seite werden zum Stand der momentanen Berechnungen und ohne jegliche Umweltfaktoren oder Tourenplanungsaspekte mit einzubeziehen, Depots in Wien, Linz/Ansfelden, Großraum Graz (Seiersberg), Salzburg/Wals-Siezenheim und Imst vorgeschlagen.

Kapitel 5: Theorie der Tourenplanung

5.1 Einleitung

Sind erst einmal die Standorte der Depots festgelegt, geht es in weiterer Folge darum die Kunden entsprechend der Vorgaben zu bedienen. Dazu entwickelte sich in den vergangenen Jahrzehnten der eigenständige Forschungsbereich der Tourenplanungsprobleme.

Grob umrissen geht es bei Tourenplanungsproblemen darum, ausgehend von einem Startpunkt (z.B. Depot, Vertriebszentrale, etc.) die Kunden so zu einer Tour zusammenzufassen, dass die zurückgelegten Wege – und damit die Transportkosten – minimiert werden.

Tourenplanungsprobleme sind im Allgemeinen äußerst Situationsspezifisch und können, neben unterschiedlichen Zielsetzungen, eine Vielzahl an Nebenbedingungen aufweisen, was eine separate Betrachtung von Fall zu Fall erforderlich macht.

5.2 Klassifizierung von Tourenplanungsproblemen

Wie schon eingangs erwähnt, stellen sich Tourenplanungsprobleme in der Regel als äußerst kompliziert und schwer zu definieren dar. Von einem Tourenplanungsproblem per se kann ob der vielen beeinflussenden Faktoren nicht gesprochen werden. Vielmehr ist jedes Problem für sich zu charakterisieren und einzuordnen, um in der Folge den entsprechenden Lösungsansatz zu finden. Tab. 14 (Vgl. *Domschke, Scholl (2010)*, S. 200 ff.) soll einen Überblick über die wichtigsten Charakteristika von Tourenplanungsproblemen zusammenfassend darstellen:

Depot- und Kundencharakteristik	
Anzahl vorhandener Depots	a) 1 (Singledepot) b) p (Multidepot)
Art des Bedarfs	a) Knotenorientiert b) Kantenorientiert c) Bedarf an Knoten und Kanten des Graphen d) Definierte Abhol- und Abladepunkte
Teillieferungen	a) nur eine Belieferung pro Kunden erlaubt b) Teillieferung erlaubt
Art der Bedienung	a) keine reinen Abhol- oder Anlieferungsaufgaben b) entweder Abholung oder Anlieferung von Gütern

Zeitliche Beschränkungen	<ul style="list-style-type: none"> a) keine Zeitlichen Beschränkungen b) ein Zeitfenster pro Kunde c) ein Zeitfenster pro Kunde, das verletzt werden darf d) mehrere Zeitfenster pro Kunde
Reihenfolgebeziehungen zwischen den Kunden	<ul style="list-style-type: none"> a) keine Reihenfolgebeziehungen b) Reihenfolgebeziehungen sind einzuhalten
Anzahl der zu bedienenden Knoten (Kunden)	<ul style="list-style-type: none"> a) jeder Knoten muss bedient werden b) Nur eine Teilmenge der Knoten ist zu bedienen c) Knoten dürfen selektiert bzw. in andere Perioden verschoben werden d) Innerhalb eines gegebenen Clusters ist ein Knoten zu bedienen
Anzahl der zu bedienenden Kanten (Kunden)	<ul style="list-style-type: none"> a) Jede Kante ist zu bedienen b) Nur ein Teil der Kanten ist zu bedienen
Fahrzeugcharakteristik	
Anzahl der verfügbaren Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> a) Beliebige viele Fahrzeuge vorhanden b) Begrenzte Anzahl M an Fahrzeugen
Kapazitätsbeschränkungen	<ul style="list-style-type: none"> a) Keine Kapazitätsbeschränkungen b) Fahrzeuge mit identischen Kapazitäten c) Fahrzeuge mit unterschiedlichen Kapazitäten
Zeitbeschränkungen fahrzeugseitig	<ul style="list-style-type: none"> a) Keine Zeitbeschränkungen b) Identische Zeitfenster für alle Fahrzeuge c) Unterschiedliche Zeitfenster
Maximale Dauer einer Tour	<ul style="list-style-type: none"> a) Keine Zeitbeschränkungen b) Identische Zeitbeschränkungen für alle Fahrzeuge c) Unterschiedliche Zeitbeschränkungen
Anzahl Touren pro Fahrzeug	<ul style="list-style-type: none"> a) Nur eine Route pro Fahrzeug erlaubt b) Mehrere Routen pro Fahrzeug erlaubt
Problemcharakteristik	
Art des Graphen	<ul style="list-style-type: none"> a) gerichtet b) ungerichtet c) gemischt
Bedienbarkeit der Kunden durch vorhandene Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> a) keine Restriktionen b) nicht jeder Kunde kann durch jedes Fahrzeug bedient werden
Anzahl der Perioden	<ul style="list-style-type: none"> a) Tourenplan über eine Periode b) Tourenplan über mehrere (T) Perioden
Zielsetzungen	<ul style="list-style-type: none"> a) Minimiere die Summe der zurückgelegten Entfernung b) Minimiere die Summe der Fahrzeuge c) Minimiere die Anzahl der benötigten Fahrzeuge d) Minimiere die Summe der Fahrtkosten

Tab. 14: Charakteristika von Tourenplanungsproblemen¹⁷

¹⁷ Vgl. Domschke, Scholl (2010), S. 200 ff.

Je nachdem, wie sich die in Tab. 14 dargestellten Faktoren nun kombinieren, lassen sich Tourenplanungsprobleme entsprechend einordnen. Eine Auswahl an häufiger vorkommenden Kombinationen soll im folgenden Abschnitt als Standardprobleme der Tourenplanung vorgestellt werden.

5.3 Standardprobleme der Tourenplanung¹⁸

Standardproblem 1: Traveling Salesman-Problem

Das Traveling Salesman Problem (kurz TSP) ist eines der klassischen und meistuntersuchten Probleme der Tourenplanung. Ausgehend von einem definierten Startpunkt soll innerhalb einer geschlossenen Route die Reihenfolge an zu besuchenden Knoten festgelegt werden. Die zurückgelegten Wege sollen minimiert werden, wobei jeder Knoten genau einmal zu besuchen ist.

Beispielsweise soll ein Vertriebsmitarbeiter auf seiner Tour eine gewisse Anzahl an Kunden besuchen und im Anschluss wieder zu seinem Arbeitsplatz zurückkehren.

Standardproblem 2: Briefträgerproblem

Das klassische Briefträgerproblem ist ein kantenorientiertes Problem in gerichteten oder ungerichteten Graphen. Als namensgebendes Beispiel kann ein Briefträger herangezogen werden, der in seinem Gebiet Post verteilt. Dazu muss er jede Straße (entspricht Kanten) auf einem geschlossenen Weg einmal durchlaufen, wobei er den zurückgelegten Weg minimieren will. Weitere Anwendungsmöglichkeiten bestehen bei Müllabfahren, Straßenreinigung, Schneeräumung etc.

Existiert eine Nebenbedingung zur Kapazitätsbeschränkung (z.B. maximale Ladekapazität von Müllwagen, Kapazität der Briefträgertasche, etc.), spricht man von einem kapazitierten Briefträgerproblem.

¹⁸ Vgl. Domschke, Scholl (2010), S. 203 ff.

Standardproblem 3: Vehicle Routing Problem

Grob umrissen geht es bei Vehicle Routing Problemen (kurz VRP) darum, ausgehend von einem Startpunkt (z.B. Depot) die Kunden so zu den zur Verfügung stehenden Fahrzeugen und den damit verbundenen Touren zuzuordnen, dass jeder Kunde innerhalb eines Netzes genau einmal angefahren wird. Dabei sollen die Transportkosten minimiert werden. Dies lässt sich unter anderem durch die Minimierung der zurückzulegenden Strecken bzw. der Fahrzeiten bewerkstelligen. Eine mögliche Lösung eines VRPs ist in Abb. 10 dargestellt. Ausgehend von einem Depot werden die insgesamt 15 Kunden so zu 4 Fahrzeugen (respektive Touren) zugeordnet, dass die Lösung bestmöglich ist.

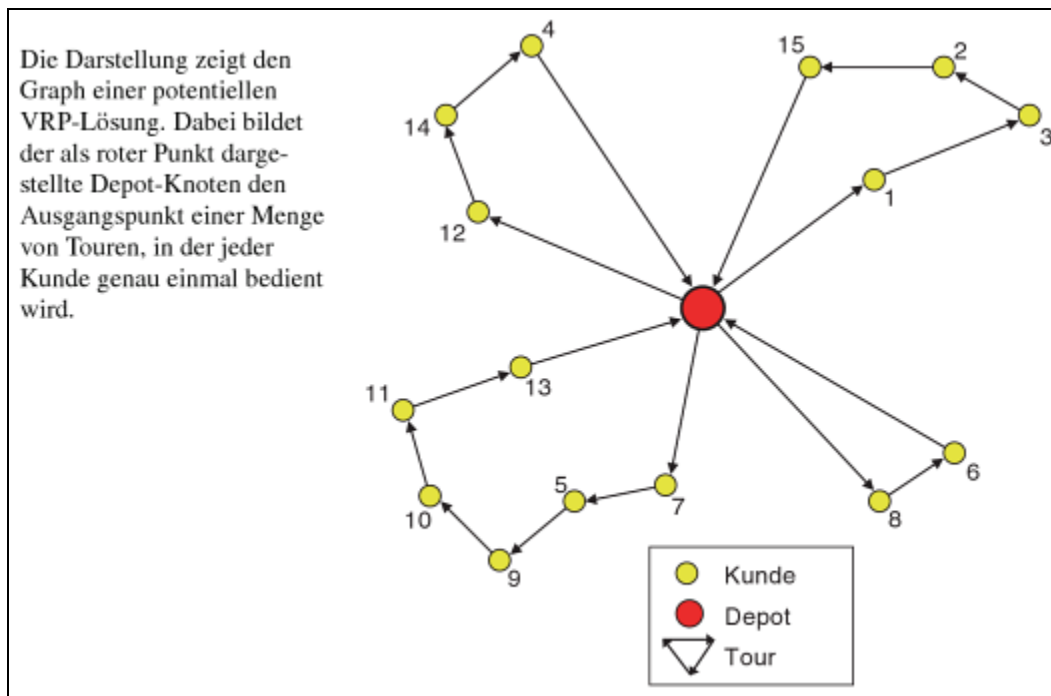


Abb. 10: Graph eines Vehicle Routing Problems¹⁹

Sind die Kapazitäten der einzelnen Transportfahrzeuge begrenzt, so spricht man von einem kapazitierten VRP.

Eine weitere mögliche Zielsetzung, neben der Minimierung der zurückzulegenden Distanzen, ist die Minimierung der benötigten Fahrzeuge.

¹⁹ Buchholz, Clausen (2009), S.156

Standardproblem 4: VRP mit Zeitrestriktionen bzw. Zeitfenstern

Bei einem VRP mit Zeitrestriktionen wird das zuvor vorgestellte VRP um zusätzliche Nebenbedingungen erweitert, die eine maximale Fahrzeit pro Tour sicherstellen soll. Relevant können solche Restriktionen vor Allem zur Arbeitszeitbeschränkung von Fahrern, aber auch beim Transport verderblicher Güter oder bei Tiertransporten sein.

Im Unterschied dazu wird bei einem VRP mit Zeitfenstern nicht die Maximaldauer der Tour festgelegt, sondern vielmehr ein oder mehrere Zeitfenster pro Lieferperiode definiert, innerhalb derer eine Belieferung möglich ist. In der Praxis ist dies zum Beispiel relevant, wenn Kunden nur zu ihren Geschäftsöffnungszeiten angefahren werden können.

Kapitel 6: Tourenplanung in der Praxis

6.1 Einleitung

Für vorliegende Arbeit sollte, nach Abschluss der Standortplanung, auch die, von deren Ergebnissen ausgehende, Tourenplanung betrachtet werden. Wie aus Kapitel 5 schon ersichtlich sein sollte, handelt es sich bei Tourenplanungsproblemen in der Regel um äußerst komplizierte Aufgaben. Um deren Bearbeitung für den Praxisanwender zu vereinfachen, ist in der Vergangenheit eine Vielzahl von professionellen Softwarepaketen auf den Markt gekommen, die sich mit Tourenplanungsproblemen befassen.

So zum Beispiel:

- *TransIT* von GTS Systems and Consulting GmbH
- *SmarTour* von PTV GmbH
- *VisiTour* von FLS GmbH
- *Plan Pilot* von PLT GmbH
- *PLANTOUR* von PASS Logistics Solutions AG

Eine umfangreiche Marktanalyse aus dem Jahr 2002 bietet *Haak, Tönjes (2002)*.

Diese Arbeit soll sich ausschließlich mit der Vorstellung und Anwendung von TransIT der Firma GTS Systems and Consulting GmbH befassen.

6.2 TransIT

6.2.1 Allgemeines

Die Tourenplanungssoftware TransIT der Firma GTS Systems and Solutions GmbH versteht sich als ganzheitliches Planungsinstrument mit grafischer Benutzeroberfläche und intuitiver Bedienweise.

Tourenplanungen können sowohl manuell als auch automatisch über mathematische Optimierungsverfahren vorgenommen werden. Sämtliche getroffenen

Entscheidungen sind sofort sichtbar und zeigen dem Anwender unmittelbar die Konsequenzen der von ihm veranlassten Änderungen hinsichtlich Kosten, Tourlänge, etc. Bei Bedarf können Änderungen mittels „Undo-Funktion“, wie aus Microsoft Office Anwendungen bekannt, sofort wieder rückgängig gemacht werden.

Weiters besteht die Möglichkeit, über Erweiterungsmodule Pläne und weiterführende Informationen via Webserver auf internetfähige Computer, Tablets, Handys etc. zu übertragen bzw. mobil übermittelte GPS-Daten der Fahrer auszuwerten.²⁰

6.2.2 Benutzeroberfläche

Herzstück der TransIT Benutzeroberfläche ist die Landkarte. In dieser lassen sich alle verplanbaren Objekte (Fahrzeuge, Depots, Kunden, etc.) sowie Touren abbilden. Objekte werden gemäß ihrer Geokoordinaten in der Karte dargestellt. Diese können entweder direkt eingegeben, oder von TransIT über die Adresse errechnet werden. Neben einer Schematischen Darstellung der Touren, können diese auch exakt dem Straßenverlauf folgend wiedergegeben werden.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Benutzeroberfläche ist der Objektbaum, rechts neben der Karte. Hier sind alle verplanbaren Objekte, geordnet nach Objekttyp, aufgeführt. Über den Objektbaum lassen sich unter anderem die Objektdialoge öffnen, in denen die einzelnen Objekttypen definiert werden.

Der dritte Hauptbestandteil der Benutzeroberfläche ist das Planungsfenster. Hier geht die eigentliche Planungsarbeit von statten – es werden die Aufträge auf die zur Verfügung stehenden Fahrzeuge verteilt. Objekte wie Fahrzeuge oder Aufträge werden per Drag&Drop-Funktion platziert und zu Touren aneinandergereiht.

Mittels Gantt-Diagramm wird der Planungsprozess grafisch dargestellt. Jede Zeile steht für ein verplantes Fahrzeug. Wegzeiten und Ladezeiten werden unterschiedlich dargestellt; ebenso Heimataufenthalte oder Zwischenstopps, die durch entsprechende Icons angezeigt werden.

Zusätzlich kann im Planungsfenster eine Optimierung zur Erlangung eines automatischen Tourenplans gestartet werden.

²⁰ Vgl. GTS Systems and Consulting GmbH (2009), S.7

6.2.3 Stammdaten

TransIT ist ein ausgesprochen stammdatenintensives Programm. Vor der erstmaligen Benutzung sind die einzelnen Objekttypen – und im weiteren Verlauf auch einzelne Objekte im Detail – zu definieren. Es folgt ein kurzer Überblick über die wichtigsten Stammdaten:

- **Fahrzeugtypen:**
Hier werden die gemeinsamen Eigenschaften der einzelnen vorhandenen Fahrzeugklassen gespeichert. Unter anderem sind die maximalen Lenkzeiten, Kosten (pro Stunde, pro km, pro Einsatz bzw. Mautkosten) und Kapazitäten (max. Lademeter, max. Volumen oder max. Gewicht) anzugeben.
- **Geschwindigkeitsprofile:**
Im Geschwindigkeitsprofil ist festgehalten, mit welcher Durchschnittsgeschwindigkeit sich ein Fahrzeug jeweils auf Autobahnen, Bundesstraßen, Landstraßen bzw. innerstädtisch fortbewegen kann. Das Geschwindigkeitsprofil ist mit den Fahrzeugtypen – und damit auch mit den einzelnen Fahrzeugen – verknüpft.
- **Fahrzeuge:**
Für jedes vorhandene Fahrzeug muss auch der Objektdialog „Fahrzeug“ bearbeitet werden. Hier ist, neben dem Fahrzeugtyp, primär die Adresse bzw. die Koordinaten des Heimatstandortes anzugeben, dem jedes Fahrzeug fix zugeordnet ist. Zudem sind die jeweiligen Qualifikationen des Fahrzeuges ersichtlich.
- **Qualifikationen:**
Hier wird die Qualifikation eines jeden Fahrzeuges festgehalten, welche Güter transportiert werden können. Beispielsweise dürfen verderbliche Güter nur mit einem Fahrzeug mit der Qualifikation „Kühlung“ transportiert werden. Als Qualifikation kann auch eine eventuell benötigte Zusatzausbildung des Fahrers (z.B. Gefahrguttransporte) angegeben werden. Bei jedem Auftrag ist in weiterer Folge die benötigte Fahrzeugqualifikation anzugeben.

- **Artikeltypen:**
Analog zu den Qualifikationen kann auf Fahrzeugtyp-Ebene festgelegt werden, welche Artikel die jeweiligen Fahrzeugtypen zu transportieren imstande sind (z.B. Tiefkühlprodukte, Flüssigkeiten etc.). Hier können auch sogenannte „verbotene Kombinationen“ nominiert werden, wenn eine Artikelart nicht gemeinsam mit anderen transportiert werden darf.
- **Aufträge:**
Aufträge sind der zentrale Planungsaspekt in TransIT. Hier werden alle relevanten Daten erhoben, die zur Verplanung der Aufträge zu Touren benötigt werden. Insbesondere geht es um benötigte Fahrzeugqualifikationen, Anlieferadresse, zu liefernde bzw. abzuholende Kapazitäten, Servicezeiten, Anlieferungszeiten (erlaubter Zeitfenster zur Belieferung des Kunden), Zeitfensterverletzungen, Kundenaufenthalt, früheste bzw. späteste Anfahrt, etc., um nur einige Punkte anzuführen.

Regelmäßig wiederkehrende Aufträge können mit Hilfe des Objektdialogs „Dauerauftrag“ angelegt werden.

Neben der manuellen Eingabe der einzelnen Daten besteht auch die Möglichkeit, Stammdaten aus Tabellen (Excel, Access, etc.) zu importieren. Sofern die Spaltenüberschriften in TransIT bekannt sind, erfolgt die Zuordnung automatisch. Andernfalls müssen die zu importierenden Spalten manuell mit den TransIT-Bezeichnungen verknüpft werden.

Hinsichtlich der Datenauswertung bietet TransIT eine Vielzahl von Möglichkeiten und Kombinationen. So lassen sich zum Beispiel Auswertungen auf Basis der einzelnen Objekttypen (Fahrzeuge, Depots, Touren, Aufträge, etc.) erstellen. Ebenso besteht die Möglichkeit über diverse Filter und Bedingungen individuelle Auswertungsparameter festzulegen, diese bei Bedarf zu gruppieren und erstellte Auswertungsschemata zu speichern.

6.3 Anwendung von TransIT

6.3.1 Problemcharakterisierung

Um das Programm TransIT auf seine Anwendbarkeit und Benutzerfreundlichkeit zu testen, sollte es auf Basis des zuvor in dieser Arbeit vorgestellten Standortproblems angewandt werden. Dazu wurden einige zusätzliche Angaben benötigt, die in Folge besprochen werden sollen.

Von den Depots aus sollen die Kunden in so wenigen Touren wie möglich versorgt werden.

Die Fahrzeugflotte ist homogen und hat eine maximale Kapazität von 163 Kartons pro Fahrzeug. Da es in TransIT nicht möglich ist, die Kapazität in Stück zu hinterlegen, entschieden wir uns ein Gewicht pro Karton von 1kg anzunehmen. Das im Dialogfenster Fahrzeugtyp festgelegte Maximalgewicht betrug somit 163kg.

Die maximale Fahrzeit, die ein Fahrer unterwegs sein darf, beträgt sieben Stunden excl. Pausen. Um die Pausen zu berücksichtigen, wurde eine Arbeitszeit von acht Stunden festgelegt. Arbeitsrechtliche Regelungen wurden in unserer Modellrechnung außer Acht gelassen.

Es sind weder spezielle Fahrzeugqualifikationen, noch verbotene Kombinationen zu beachten.

Die Anlieferung ist nur während der Öffnungszeiten der Kunden möglich. Diese sind als Zeitfenster in den Auftragsdaten hinterlegt. Eine Zeitfensterverletzung ist nicht vorgesehen. Die Servicezeit pro Kunden beträgt 15 Minuten.

Für jeden Kunden sollte jeweils ein (Dauer-) Auftrag eingerichtet werden. Deshalb sind im weiteren Verlauf der Arbeit die Termini „Kunde“ und „Auftrag“ gleichzusetzen und werden auch im Text so verwendet.

6.3.2 Implementierung in TransIT

Als erstes galt es die bisherigen Kundenstammdaten des Standortproblems um die zusätzlichen Informationen des Tourenplanungsproblems zu erweitern. Also wurden die Öffnungszeiten der Kunden, die benötigten Fahrzeugqualifikationen bzw. der

verlangte Leistungstyp, die Servicezeiten sowie die Standortkoordinaten der Kunden den entsprechenden Kundennummern zugeordnet.

Da die Koordinaten der Kundenstandorte als Lagrange-Koordinaten übermittelt wurden, TransIT aber nur GPS/WGS84 Koordinaten akzeptiert, mussten diese vorrangig noch transformiert werden. Dies geschah mittels des Koordinaten-Transformationservices auf www.geoland.at, einem Geodatenportal der österreichischen Länder bzw. der Ämter der Landesregierungen. Es werden die Koordinaten im Ursprungsformat (WGS84, Gauß-Krüger, Lambert oder BMN) importiert, transformiert und als Excel-Tabelle wieder ausgegeben.

Einen Einblick in die Theorie der Koordinaten geben unter anderem *Bauer, Manfred: Vermessung und Ortung mit Satelliten, Heidelberg 1994* und *Kohlstock, Peter: Kartografie, Paderborn 2004*.

Ein Problem stellte sich bei der Implementierung der Anfahrrhythmen dar. Laut Angabe wurden Kunden je nach Bedarf entweder 14-tägig, wöchentlich oder 2 Mal pro Woche angefahren. Diese Bedingung lässt sich allerdings in TransIT nicht darstellen, wie auch von Dr. Tore Grünert von der Firma GTS Systems and Consulting GmbH telefonisch bestätigt wurde. Es sei aber angedacht dieses Feature in zukünftigen Programmversionen zu berücksichtigen.

Nachdem die Kundenstammdaten vervollständigt waren, konnten sie in TransIT importiert werden. Ebenso wurden die notwendigen Objekttypen (siehe Kapitel 6.2.3) angelegt und somit Fahrzeuge, Depotstandorte etc. definiert. Da die Depotstandorte allerdings im Fünf-, Sechs- bzw. Sieben-Depotfall nicht übereinstimmten, waren diese für jeden Rechendurchlauf neu anzulegen.

Nachdem alle Stammdaten gepflegt waren, sollte eine automatische Tourenplanung auf einem AMD Athlon™ 64 3400+-System mit 2,20 GhZ, 990 MB RAM und einer 64-Bit Windows7 Version durchgeführt werden. Für die ca. 4500 Kunden betrug die von TransIT zur Lösung vorberechnete Zeit allerdings mehrere Wochen. Da keine alternative, lizenzierte Hardware mit höherer Rechenleistung zur Verfügung stand, wurde die Kundenzahl schrittweise reduziert. Die veranschlagten Rechenzeiten für 900 Kunden betragen immer noch jeweils ca. 210 Sekunden; für 600 Kunden ca. 60 Sekunden pro Auftrag. Auch eine manuelle Zuordnung der Kunden zu den Depots

mittels Nearest-Neighbour-Heuristik (kurz NNH) brachte keine Verkürzung der Rechendauer ein. Da das System bei 600 Kunden und einer Gesamtrechenzeit von ca. 10 Stunden regelmäßig abstürzte, kamen wir überein, die Kundenzahl weiter zu reduzieren um zumindest die Benutzerfreundlichkeit des Programms zu durchleuchten.

6.3.3 zugrundeliegender Algorithmus

Um aufgrund der begrenzten Rechenkapazität zeitlich sinnvolle Rechendurchläufe durchführen zu können, mussten wir die Kundenanzahl auf 200 reduzieren. Dadurch verringerten wir die benötigte Rechenzeit pro Auftrag auf ca. 10 Sekunden. Der Wert der Tourenplanung für das Gesamtproblem von ca. 4500 Kunden ging durch diese Maßnahme zwar verloren, nichtsdestotrotz erlaubte diese Kundenzahl eine aussagekräftige Evaluierung der Bedienung und der Algorithmen von TransIT.

Die zuvor durchgeführte manuelle Zuordnung mittels NNH erlaubte uns nun einen Vergleich zu der automatischen Tourenplanung anzustellen. Dazu wurden sowohl für die manuell zugeordneten als auch die automatischen (freien) Datensätze Rechendurchläufe mit fünf, sechs und sieben Depotstandorten durchgeführt.

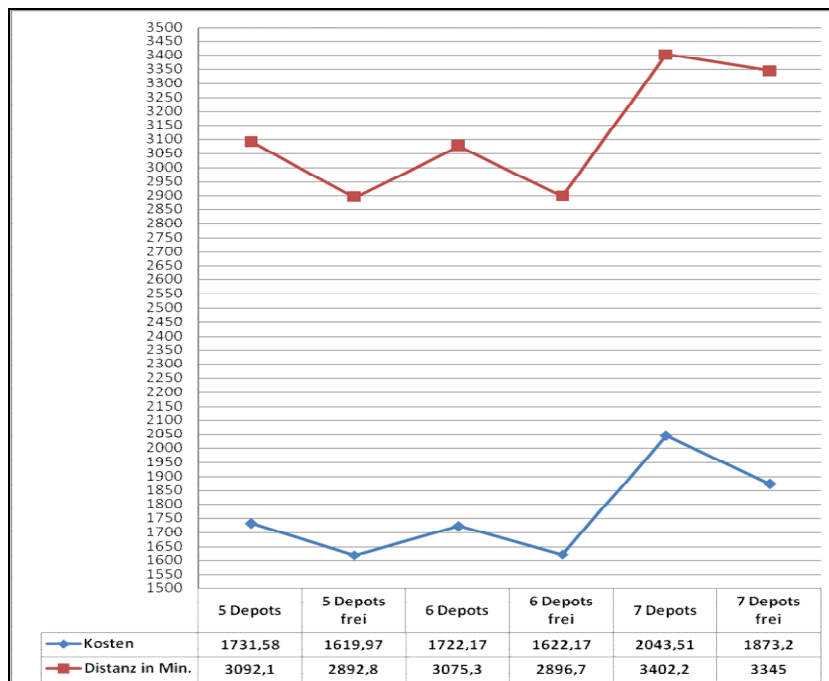


Abb. 11: Vergleich man. Zuordnung mit NNH vs. automat. Zuordnung durch TransIT

Abb. 11 zeigt, dass die Zielfunktionswerte der automatischen Planung (x Depots frei) stets signifikant unter denen der manuell zugeordneten liegen. Das bedeutet zum einen, dass TransIT einen komplexeren Algorithmus als die NNH verwenden dürfte und zum anderen, dass im Vergleich zu einer manuellen Zuordnung durchaus Verlass auf die automatische Planung von TransIT ist.

Außerdem zeigt sich, dass die Transportkosten bei sieben Depots sprunghaft anstiegen, was unsere Standortentscheidung hin zu 5-Depots zusätzlich untermauerte.

Nach diesen Erkenntnissen nahmen wir an, es handle sich um einen Savings-Algorithmus. Auf Anfrage bei der Herstellerfirma erhielt ich folgende Antwort:

„TransIT enthält zahlreiche Algorithmen, die über sog. Optimierungsparameter konfiguriert werden können. [...] Je nachdem, wie man die Parameter wählt, verhält sich das ganze auch sehr unterschiedlich. Die normalen Algorithmen gehen aber weit über das hinaus, was man mit dem klassischen Savings- bzw. Nearest-Neighbour erreichen kann.“²¹

Laut diesen Aussagen handelt es sich also um eine komplexe, situationsabhängige Verschränkung verschiedener Algorithmen, denen allerdings auch nicht weiter auf die Spur zu kommen war. Es konnte also kein zugrundeliegender Algorithmus definiert werden.

6.3.4 Arbeiten mit TransIT

Um die Benutzerfreundlichkeit des Programms zu testen, wurde eine Zahl an Tourenplanungen vorgenommen. Anhand des 5 Depot Falls mit den Standorten Wien, Linz/Ansfelden, Großraum Graz (Seiersberg), Salzburg/Wals-Siezenheim und Imst soll dies nun dargestellt werden.

Die einzelnen Objektdialoge wurden zuvor angelegt und die Kundenstammdaten importiert. Beides ging mit mittlerem Zeitaufwand problemlos vonstatten. Da die Spaltenüberschriften in MS Excel zuvor entsprechend der Bezeichnungen in TransIT gewählt wurden, war selbst hier kein manuelles eingreifen notwendig. Zu erwähnen

²¹ E-Mail von Dr. Tore Grünert vom 25. Mai 2011

ist, dass die Fahrzeuge als Musterfahrzeuge angelegt wurden. Dies erlaubte uns, an jedem Standort eine beliebige Zahl an identischen Transportfahrzeugen einzufügen.

Als nächster Schritt wurde ein Anbindbarkeitstest für die Kunden-, Depot- und Fahrzeugstandorte durchgeführt. Die wenigen Kundenstandorte bei denen es Probleme mit der Anbindung gab, konnten mühelos z.B. durch ergänzen der Adressdaten und erneute Geokodierung manuell nachbearbeitet werden. Die sehr guten Suchfilter des Objektbaums halfen dabei die fraglichen Standorte mit wenigen Mausklicks darzustellen.

Zur eigentlichen Tourenplanung mussten nur noch die entsprechenden Aufträge sowie die zur Verfügung stehenden Fahrzeuge im Planungsfenster positioniert und die automatische Planung gestartet werden.

Aufgrund der de facto unbegrenzten Fahrzeugressourcen und dem Fehlen konkreter Auftragstermine werden allerdings sämtliche Aufträge an einem Tag verplant. Das macht TransIT zur Beantwortung der Frage, wie viele Fahrzeuge angeschafft werden sollen, nur bedingt hilfreich.

Abb. 12 sowie Tab. 15 und 16 stellen die Ergebnisse der automatischen Planung dar. Sowohl die Ergebniskarte als auch die Auswertungstabellen können direkt mittels der zahlreichen Auswertungsfunktionen aus TransIT erstellt werden.

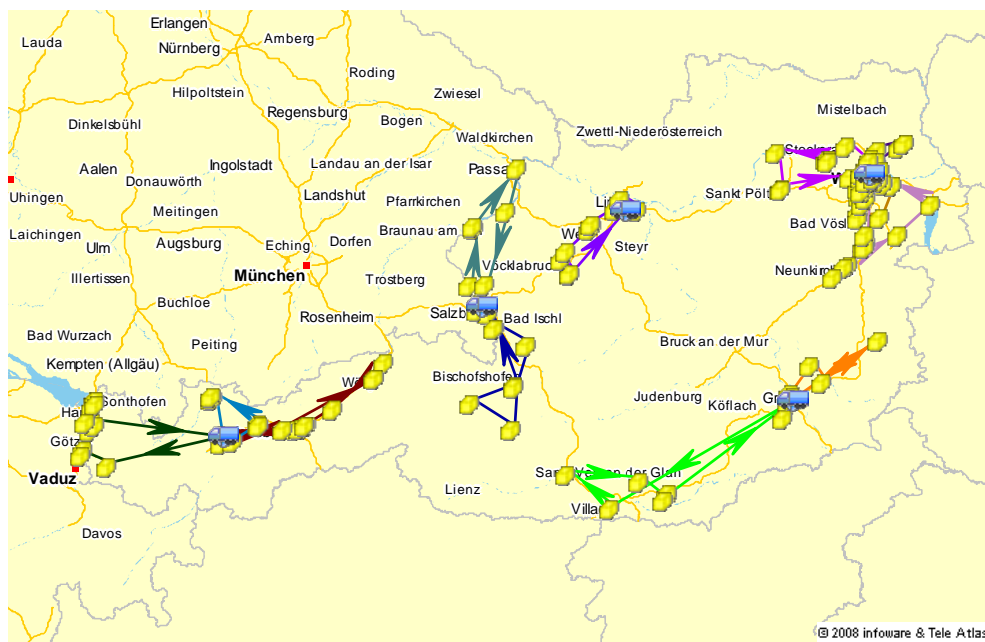


Abb. 12: Routendarstellung der Ergebnisse der Mustertourenplanung²²

²² Quelle: TransIT

Nr.	Tourstart	Tourende	Tourdauer	Lenkzeit	Adresse Startposition	Kosten	Strecke
1	26.04.2010 08:54	26.04.2010 16:09	07:15	05:00	5071 wals-siezenheim; kasernenstr 1	138,15	246,70
2	26.04.2010 05:42	26.04.2010 13:33	07:51	05:06	6460 imst;	164,75	294,20
3	26.04.2010 06:13	26.04.2010 13:43	07:30	05:00	5071 wals-siezenheim; kasernenstr 1	157,47	281,20
4	26.04.2010 05:09	26.04.2010 12:33	07:24	04:09	6460 imst;	159,04	284,00
5	26.04.2010 06:52	26.04.2010 10:09	03:17	00:47	1050 Wien; Arbeitergasse 52	11,09	19,80
6	26.04.2010 05:56	26.04.2010 13:15	07:19	01:49	1050 Wien; Arbeitergasse 52	28,73	51,30
7	26.04.2010 05:48	26.04.2010 13:45	07:57	03:27	1050 Wien; Arbeitergasse 52	114,41	204,30
8	26.04.2010 06:12	26.04.2010 12:33	06:21	04:06	8054 seiersberg	135,24	241,50
9	26.04.2010 07:24	26.04.2010 15:12	07:48	02:03	1050 Wien; Arbeitergasse 52	29,90	53,40
10	26.04.2010 06:04	26.04.2010 14:02	07:58	06:13	8054 seiersberg	250,10	446,60
11	26.04.2010 05:52	26.04.2010 13:39	07:47	03:17	1050 Wien; Arbeitergasse 52	55,33	98,80
12	26.04.2010 06:43	26.04.2010 11:38	04:55	03:25	6460 imst;	84,28	150,50
13	26.04.2010 06:34	26.04.2010 14:09	07:35	03:05	1050 Wien; Arbeitergasse 52	64,01	114,30
14	26.04.2010 07:41	26.04.2010 13:34	05:53	03:23	4052 Ansfelden;	98,78	176,40
15	26.04.2010 07:16	26.04.2010 15:15	07:59	04:29	1050 Wien; Arbeitergasse 52	128,69	229,80
Anz. Stopps	Anz. Aufträge	Max.Menge Gewicht	Max.Auslastung Gewicht %	Fahrzeug Bezeichnung			
9	9	43,00	26,4	lkw1			
11	11	43,00	26,4	lkw3			
10	10	31,00	19,0	lkw1			
13	13	40,00	24,5	lkw3			
10	10	32,00	19,6	lkw2			
22	22	97,00	59,5	lkw2			
18	18	68,00	41,7	lkw2			
9	9	44,00	27,0	lkw4			
23	23	76,00	46,6	lkw2			
7	7	21,00	12,9	lkw4			
18	19	69,00	42,3	lkw2			
6	6	18,00	11,0	lkw3			
18	18	79,00	48,5	lkw2			
10	10	36,00	22,1	lkw5			
14	14	57,00	35,0	lkw2			

Tab. 15: Ergebnis der Mustertourenplanung

Nr.	Tour Bezeichnung	Tour max. Lenkzeit	Tourstart	Tourende	Tourdauer	Tourkosten	Tour Strecke
1	lkw1 - 26.04.10 00:00-1463	05:00	26.04.2010 08:54	26.04.2010 16:09	07:15	138,15	246,70
2	lkw1 - 26.04.10 00:00-1463	05:00	26.04.2010 08:54	26.04.2010 16:09	07:15	138,15	246,70
3	lkw1 - 26.04.10 00:00-1463	05:00	26.04.2010 08:54	26.04.2010 16:09	07:15	138,15	246,70
4	lkw1 - 26.04.10 00:00-1463	05:00	26.04.2010 08:54	26.04.2010 16:09	07:15	138,15	246,70
5	lkw1 - 26.04.10 00:00-1463	05:00	26.04.2010 08:54	26.04.2010 16:09	07:15	138,15	246,70
6	lkw1 - 26.04.10 00:00-1463	05:00	26.04.2010 08:54	26.04.2010 16:09	07:15	138,15	246,70
7	lkw1 - 26.04.10 00:00-1463	05:00	26.04.2010 08:54	26.04.2010 16:09	07:15	138,15	246,70
8	lkw1 - 26.04.10 00:00-1463	05:00	26.04.2010 08:54	26.04.2010 16:09	07:15	138,15	246,70
9	lkw1 - 26.04.10 00:00-1463	05:00	26.04.2010 08:54	26.04.2010 16:09	07:15	138,15	246,70
10	lkw1 - 26.04.10 00:00-1463	05:00	26.04.2010 08:54	26.04.2010 16:09	07:15	138,15	246,70
11	lkw1 - 26.04.10 00:00-1463	05:00	26.04.2010 08:54	26.04.2010 16:09	07:15	138,15	246,70
Tour Max.Auslastung %	Anz. Zwischenstopps	Anz. Aufträge	Ankunft	Abfahrt	Fahrzeit	reine Lenkzeit	
26,4	9	9		26.04.2010 08:54		00:00	
26,4	9	9	26.04.2010 09:00	26.04.2010 09:15	00:06	00:06	
26,4	9	9	26.04.2010 09:22	26.04.2010 09:37	00:07	00:07	
26,4	9	9	26.04.2010 09:55	26.04.2010 10:10	00:18	00:18	
26,4	9	9	26.04.2010 11:02	26.04.2010 11:17	00:52	00:52	
26,4	9	9	26.04.2010 11:23	26.04.2010 11:38	00:06	00:06	
26,4	9	9	26.04.2010 12:43	26.04.2010 12:58	01:05	01:05	
26,4	9	9	26.04.2010 13:40	26.04.2010 13:55	00:42	00:42	
26,4	9	9	26.04.2010 15:14	26.04.2010 15:29	01:19	01:19	
26,4	9	9	26.04.2010 15:51	26.04.2010 16:06	00:22	00:22	
26,4	9	9	26.04.2010 16:09		00:03	00:03	
Lenkzeitpausendauer	Position in Tour	Bezeichnung	Tourellement Strecke	Auslastung Gesamt %	Gewicht Gesamt	Zuführung Gewicht	
00:00	1	lkw1	0,00	0,00	0,00	0,00	
00:00	2	407544	4,60	26,38	43,00	7,00	
00:00	3	564153	3,40	22,09	36,00	5,00	
00:00	4	545335	14,50	19,02	31,00	3,00	
00:00	5	331314	41,70	17,18	28,00	5,00	
00:00	6	409532	2,40	14,11	23,00	3,00	
00:00	7	543488	54,40	12,27	20,00	11,00	
00:00	8	543686	46,00	5,52	9,00	3,00	
00:00	9	561977	57,00	3,68	6,00	3,00	
00:00	10	564716	20,90	1,84	3,00	3,00	
00:00	11	lkw1	1,80	0,00	0,00	0,00	

Tab. 16: Auszug, Tourdetails von Tab. 15 Tour 1

Manuelle Änderungen an der automatischen Planung sind über Karte oder Planungsfenster jederzeit möglich und auch wieder rückgängig zu machen.

6.4 Erkenntnisse

TransIT ist ausgesprochen Stammdatenintensiv. Der Datenimport sowie die manuelle Eingabe der Stammdaten funktioniert reibungslos. Allerdings liegt in der Datenlastigkeit zugleich der größte Vorteil wie auch die Schwierigkeiten des Programms. Einerseits können verschiedene Planungsszenarien ohne viel Aufwand erstellt werden. Auch die Änderung bzw. Anpassung bereits erstellter Pläne ist einfach. Es wurden zudem viele wichtige Nebenbedingungen berücksichtigt. So ist etwa die Beachtung von Zeitfenstern, erlaubten Liefertagen oder verschiedenste Transportmittel-Voraussetzungen möglich. Einzig die Festlegung von Anfahrtsrhythmen (wie etwa 2 Mal pro Woche oder alle drei Wochen) ohne die genaue Definition des Anfahrtsdatums nicht möglich.

Die Nachteile eines großen Stammdatensatzes sind, wie üblich, ein hoher Aufwand bei der Datenpflege. Da TransIT Stammdaten intensiv nutzt, müssen diese immer vollständig und aktuell sein.

Die eigentliche Planungsarbeit ist intuitiv und es können eine Vielzahl an Szenarien dargestellt werden (mehrtägige Touren, Heimataufenthalte, etc.). Aufgrund der integrierten Karte sind die Planungsschritte übersichtlich nachzuverfolgen und es ist eine ständige visuelle Überprüfung der Stammdaten sowie der Ergebnisse möglich.

Sind viele Dialogfenster geöffnet, sind die wichtigen Planungselemente allerdings schnell verdeckt. Sie müssen dann entweder mühsam aus dem Weg geschoben oder geschlossen werden. Eine Art Taskleiste ist im Programm nicht enthalten. Je größer allerdings der zur Verfügung stehende Bildschirm ist, umso weniger fällt dieser Schwachpunkt auf.

Für strategische Planungsaufgaben ist TransIT ob der vielen Datenvoraussetzungen nur bedingt einsetzbar. Zur Planung konkreter, operativer Aufgaben – besonders im Bereich von KMUs – scheint das Programm allerdings bestens geeignet. Vorauszusetzen ist lediglich eine im Verhältnis zur Auftragszahl ausreichende Rechenleistung.

Kapitel 7: Verzeichnisse

7.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Beispielhafter Entscheidungsbaum des B&B Verfahrens.....	19
Abb. 2: Geografische Verteilung der ca. 4500 Kundenstandorte	22
Abb. 3: Zielfunktionswerte im Verhältnis zur Anzahl der eröffneten Standorte.....	25
Abb. 4: Geografische Verteilung der 3500 wichtigsten Kunden	26
Abb. 5: Zu öffnende Depots nach dem p-Median Modell mit $P=5$	28
Abb. 6: Zu öffnende Depots nach dem p-Median Modell mit $P=6$	28
Abb. 7: Zu öffnende Depots nach dem p-Median Modell mit $P=7$	29
Abb. 8: Zu öffnende Depots nach dem WLP Modell	32
Abb. 9: Zu öffnende Depots nach dem WLP Modell mit $b_j = 1$	33
Abb. 10: Graph eines Vehicle Routing Problems	38
Abb. 11: Vergleich manuelle Zuordnung mit NNH vs. automatische Zuordnung durch TransIT	46
Abb. 12: Routendarstellung der Ergebnisse der Mustertourenplanung	48

Ich habe mich bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte ausfindig zu machen und ihre Zustimmung zur Verwendung der Bilder in dieser Arbeit eingeholt. Sollte dennoch eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir.

7.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Katalog von Standortfaktoren	5
Tab. 2: Beispiel Eröffnungsverfahren ADD: Transportkostenmatrix	14
Tab. 3: Beispiel Eröffnungsverfahren ADD: Iteration 1	14
Tab. 4: Beispiel Eröffnungsverfahren ADD: Iteration 2	15
Tab. 5: Beispiel Eröffnungsverfahren ADD: Iteration 3	15
Tab. 6: Beispiel Eröffnungsverfahren ADD: Lösung	16
Tab. 7: Beispiel Eröffnungsverfahren DROP: Iteration 1	17
Tab. 8: Beispiel Eröffnungsverfahren DROP: Iteration 2	17
Tab. 9: Beispiel Eröffnungsverfahren DROP: Lösung	18
Tab. 10: Zielfunktionswerte des p-Median Modells mit 1000 Kunden	24
Tab. 11: Ergebnisse der Berechnungen des p-Median Modells mit 3500 Kunden	27
Tab. 12: Ergebnisse der Berechnungen des WLP mit 3500 Kunden	31
Tab. 13: Ergebnisse der Berechnungen des WLP mit 3500 Kunden und $b_j = 1$	32
Tab. 14: Charakteristika von Tourenplanungsproblemen	36
Tab. 15: Ergebnis der Mustertourenplanung	49
Tab. 16: Auszug. Tourdetails von Tab. 15 Tour 1	49

7.3 Literatur

Arnold, D. (Hrsg.) et al. (2008).

Handbuch Logistik (3. Ausg.). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Arostequi Jr., M. A., Kadipasaoglu, S. N., & Khumawala, B. M. (2006).

An empirical comparison of Tabu Search, Simulated Annealing and Genetic Algorithms for facilities location problems. *International Journal of Production Economics*, 103, S. 742-754.

Beasley, J. E. (1993).

Lagrangean heuristics for location problems. *European Journal of Operational Research*, 65 (3), S. 383-399.

Bruns, A. D. (1998).

Zweistufige Standortplanung unter Berücksichtigung von Tourenplanungsaspekten: primale Heuristiken und lokale Suchverfahren. Dissertation. St. Gallen: Hochschule für Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften.

Buchholz, P., & Clausen, U. (Hrsg.). (2009).

Große Netze der Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Cura, T. (2010).

A parallel local search approach to solving the uncapacitated warehouse location problem. *Computers & Industrial Engineering*, 59, S. 1000-1009.

Domschke, W., & Drexl, A. (1996).

Logistik: Standorte (4. Ausg.). München: Oldenbourg Verlag.

Domschke, W., & Drexl, A. (2005).

Einführung in Operations Research (6. Ausg.). Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag.

Domschke, W., & Scholl, A. (2010).

Logistik: Rundreisen und Touren (5. Ausg.). München: Oldenbourg Verlag.

Ellinger, T., Beuermann, G., & Leisten, R. (2003).

Operations Research: Eine Einführung (6. Ausg.). Berlin, Heidelberg: Springer.

Erlenkotter, D. (1978).

A Dual-Based Procedure for Uncapacitated Facility Location. *Operations Research*, 26, S. 992-1009.

GTS Systems and Consulting GmbH. (21. September 2009).

TransIT: Einführung in die Bedienung.

Gudehus, T. (1999).

Logistik: Grundlagen, Strategien, Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

- Haak, L., & Tönjes, M. (2002).**
Konsistente Informationsbasis durch Telematiksysteme. *Industrie Management* ,18 (5), S. 67-77.
- Heisig, G., & Minner, S. (1999).**
OR Software: ILOG OPL Studio Version 2.0. *OR Spektrum* , 21, S. 419-427.
- ILOG S.A. (09. September 2008).**
ILOG OPL Development Studio. *PDF Documentation* . Berkeley, California.
- Janáček, J., & Buzna, L. (2008).**
An acceleration of Erlenkotter-Körkel's algorithms for the uncapacitated facility location problem. *Annals of Operations Research* , 164 (1), S. 97-109.
- Klose, A. (1998).**
A branch and bound algorithm for an uncapacitated facility location problem with a side constraint. *International Transactions in Operational Research* , 5 (2), S. 155-168.
- Klose, A. (2000).**
A Lagrangean relax-and-cut approach for the two-stage capacitated facility location problem. *European Journal of Operational Research* , 126, S. 408-421.
- Klose, A. (2001).**
Standortplanung in distributiven Systemen: Modelle, Methoden, Anwendungen. Heidelberg: Physica Verlag.
- Klose, A., & Drexl, A. (2005).**
Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research* , 162, S. 4-29.
- Kohlstock, P. (2004).**
Kartographie: Eine Einführung. Paderborn: Verlag Ferdinand Schöningh.
- Körkel, M. (1989).**
On the exact solution of large-scale simple plant location problems. *European Journal of Operations Research* , 39, S. 157-173.
- Lederer, D. (2007).**
Python und Zope als Unterrichtswerkzeuge. Diplomarbeit. München: GRIN Verlag.
- Michel, L., & Van Hentenryck, P. (2004).**
A simple tabu search for warehouse location. *European Journal of Operational Research* , 157, S. 576-591.
- Österreichische Länder bzw. Ämter der Landesregierungen. (2011).**
Geoland. Abgerufen am Mai 2011 von <http://www.geoland.at>
- Parragh, S. (27. September 2009).**
Tutorial. *HPC-Cluster WIWI: High Performance Computing* .

Reimann, M. (1998).

Tourenplanung: Theorie und Praxis. Diplomarbeit. Wien: Sozial- und
Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät der Universität Wien.

Stock, J. R., & Lambert, D. M. (1987).

Strategic logistics management (2. Ausg.). Homewood, Illinois: Irwin.

Sun, M. (2006).

Solving the uncapacitated facility location problem using tabu search. *Computers &
Operations Research* , 33, S. 2563-2589.

Vahrenkamp, R. (2007).

Logistik: Management und Strategien (6. Ausg.). München: Oldenburg Verlag.

Waue, V. (2007).

*Entwicklung von Software zur Lösung von gemischt-ganzzahligen
Optimierungsmodellen mit einem Branch and Cut Ansatz.* Berlin.

Anhang A: p-Median Implementierung

p-Median.mod:

```

/*****
* OPL 6.1 Model
* Author: Florian Fuehrer
* Creation Date: 30.01.2010 at 14:44:03
*****/
int P=...;
int n=...;
range Customers=1..n;
range Locations=1..n;

int Demand[Customers]=...;
float Distance [Customers][Locations]=...;

dvar boolean OpenWarehouse [Locations];
dvar boolean ShipToCustomer [Customers][Locations];

minimize
    sum(c in Customers, l in Locations)
        Demand[c]*Distance[c][l]*ShipToCustomer[c][l];

subject to {
    forall (c in Customers)

        oneCperL:
        sum(l in Locations) ShipToCustomer[c][l]==1;

        NoOfWarehouses:
        sum(l in Locations) OpenWarehouse[l]==P;

        forall (c in Customers, l in Locations)
            ShipIfOpen:
            ShipToCustomer[c][l] <= OpenWarehouse[l];
}

```

p-Median_3500_5.dat:

P=5;

n=3500;

Demand=[

69, 61, 58, 58, 56, 51, 50, 49, 48, 46, 46, 45, 44, 41, 40, 40, 38, 38, 37, 37, 37, 37, 37, 37, 37, 37, 36,
36, 36, 36, 35, 35, 35, 35, 35, 34, 34, 34, 33, 33, 33, 33, 33, 33, 33, 33, 32, 32, 32, 32, 31, 31,
31, 31, 31, 30, 29, 29, 29, 29, 29, 29, 29, 29, 29, 29, 28, 28, 28, 28, 27, 27, 27, 27, 27, 27, 27, 27,
27, 27, 27, 26, 26, 26, 26, 26, 26, 26, 26, 26, 26, 25, 25, 25, 25, 25, 25, 25, 25, 25, 25, 25,
25, 25, 25, 24, 24, 24, 24, 24, 24, 24, 24, 24, 24, 24, 24, 24, 24, 23, 23, 23, 23, 23, 23, 23, 23,
23, 23, 23, 23, 23, 23, 23, 23, 23, 23, 23, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22,
22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 21, 21, 21, 21, 21, 21, 21, 21, 21, 21,
21, 20, 20,
20,
20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 19, 19, 19, 19, 19, 19, 19, 19, 19, 19, 19, 19, 19, 19, 19, 19, 19,
19,
19, 19, 18,
18,
18, 18, 18, 18, 18, 18, 18, 18, 18, 18, 18, 18, 18, 17, 17, 17, 17, 17, 17, 17, 17, 17, 17, 17, 17,
17, ...]

Distance = [

[0 , 199.47 , 274.65 , 264.64 , 112.49 , 269.67 , 194.68 , 268.76 , 270.23 , 268.38 , 274.31 ,
270.21 , 270.34 , 200.46 , 267 , 258.26 , 199.31 , 265.63 , 268.99 , 394.01 , 260.76 , 110.29 ,
266.75 , 274.47 , 225.78 , 235.61 , 264.74 , 267.07 , 261.97 , 267.61 , 273.93 , 226.79 , 33.1 ,
225.8 , 268.98 , 272.12 , 315.82 , 265.69 , 260.56 , 267.41 , 269.57 , 307.91 , 262.36 , 311.34
 , 266.09 , 297.36 , 477.07 , 258.52 , 260.2 , 275.84 , 262.69 , 126.29 , 274.65 , 265.18 ,
361.11 , 269.25 , 462.77 , 297.52 , 211.45 , 459.38 , 264.73 , 275.57 , 269.25 , 273.39 , 10.11
 , 476.74 , 313.35 , 268.85 , 267.8 , 259.26 , 272.6 , 272.8 , 160.4 , 268.51 , 267.86 , 273.19 ,
464.14 , 391.4 , 273.71 , 265.55 , 228.55 , 264.18 , 244.24 , 271.25 , ...]

[200.89 , 3.55 , 274.09 , 255.16 , 226.94 , 257.78 , 7.97 , 259.83 , 266.61 , 259.45 , 263.07 ,
261.28 , 261.69 , 4.95 , 253.96 , 64.96 , 3.72 , 260.61 , 257.1 , 207.22 , 257.91 , 223.62 ,
254.65 , 266.25 , 282.76 , 112.47 , 260.47 , 251.23 , 254.82 , 258.69 , 262.05 , 281.65 , 179.4
 , 283 , 257.1 , 260.81 , 129.03 , 257.79 , 257.76 , 261.18 , 254.26 , 121.12 , 255.09 , 124.55 ,
258.35 , 245.71 , 290.28 , 261.7 , 258.59 , 269.76 , 256.59 , 250.07 , 274.09 , 257.44 , 174.31
 , 258.88 , 275.97 , 290.25 , 270.41 , 272.59 , 253.93 , 83.18 , 263.02 , 264.46 , 192.88 ,
289.95 , 126.56 , 262.61 , 258.23 , 65.96 , 263.67 , 247.76 , 57.49 , 262.88 , 260.37 , 262.01 ,
277.35 , 204.61 , 265.49 , 258.03 , 69.92 , 258.07 , 258.68 , 261.35 , ...]

...]

Anhang B: WLP Implementierung

WLPunkap.mod:

```

/*****
 * OPL 6.1 Model
 * Author: Florian Fuehrer
 * Creation Date: 17.02.2010 at 18:10:06
 *****/
int FixedCost = ...;
int n=...;
range Customers=1..n;
range Warehouses=1..n;
int Demand[Customers] = ...;
float Distance[Customers][Warehouses] = ...;
dvar boolean Open[Warehouses]; // =y
dvar int Supplied[Customers][Warehouses]; // =x

minimize
  sum( w in Warehouses )
    FixedCost * Open[w] +
  sum( w in Warehouses , c in Customers )
    Distance[c][w] * Supplied[c][w];

subject to{
  forall( c in Customers )
    SatisfyDemand:
      sum( w in Warehouses )
        Supplied[c][w] == Demand[c];
  forall( w in Warehouses, c in Customers )
    SupplyIfOpen:
      Supplied[c][w] <= Demand[c]*Open[w];
  forall(w in Warehouses, c in Customers)
    SupplyNonNegative:
      Supplied[c][w] >= 0;
}
```


Anhang C

Curriculum Vitae:

Ausbildung:

Okt. 2004 – Aug. 2011

Studium der internationalen BWL (Uni Wien)

Spezialisierungen:

- Externe Unternehmensrechnung
Univ. Prof. Dr. Otto A. Altenburger
- Logistikmanagement
Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Richard F. Hartl
- Diplomarbeit zum Thema „Standortplanung unter Berücksichtigung von Tourenplanungsaspekten am Beispiel der Konsumgüterindustrie“
Univ. Prof. Dr. Karl F. Dörner

2000 – 2004

BG/BRG Wieselburg/Erlauf

1996 – 2000

BG/BRG Schwechat

Berufserfahrung und Praktika:

Aug. 2010 – Feb. 2011

Robert Bosch GmbH

Werk Solothurn, Schweiz, Scintilla AG

- Praktikant techn. Einkauf

April 2009 – Juni 2010

Manpower/Thomas Bruckner's „rent a cook“

- kitchenhost

Nov. 2004 – Okt. 2009

BG/BRG Wieselburg

- Veranstaltungskoordinator, Leitung des Organisationskomitees Abschlussball

August 2006

Raiffeisen Landesbank Niederösterreich-Wien

August 2007

Filiale Breitenfurterstraße 1230 Wien

Abstract

Diese Diplomarbeit befasst sich mit der Standortplanung und der darauf aufbauenden Tourenplanung für ein Unternehmen der Konsumgüterindustrie in Österreich.

In einem ersten Teil werden die Theorie und die Praxis der Standortplanung betrachtet. Ausgehend von extern vorgegebenen Standorten von ca. 4500 Kunden und der dazugehörigen $m = n$ Distanzmatrix, tasten wir uns schrittweise an die Lösung heran. Betrachtet werden Berechnungen nach p-Median sowie WLP Modellen.

Der zweite Abschnitt der Arbeit befasst sich mit den Möglichkeiten, die eine moderne Tourenplanungssoftware zur Lösung eines, an die Standortplanung angeschlossenen, Vehicle Routing Problems bietet. Die Software wird auf ihre Anwenderfreundlichkeit geprüft und mithilfe eines Musterszenarios getestet.

Die Berechnungen zu unserem Projekt werden im Wesentlichen vom enormen Rechenaufwand dieses Problems und den dafür vorhandenen Mitteln begrenzt. Außerdem zeigt sich, dass eine grundlegende Herausforderung bei derartigen Projekten in der Datenkonsistenz liegt. Trotzdem können zufriedenstellende und plausible Lösungen gefunden und aufgezeigt werden.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich folgenden Personen, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit – und darüber hinaus – unterstützt haben, danken:

Meinen Eltern Christine und Rudolf für die grenzenlose Unterstützung nicht nur im Zuge der Diplomarbeit, sondern während des gesamten Studiums.

Frau Mag. Elisabeth Gussmagg-Pfliegl für Ihre wertvolle Hilfe, Aufmunterung und die Beantwortung all meiner Fragen.

Frau Sophie Parragh, PhD, für Ihre Hilfestellung bei der Implementierung und bei technischen Problemen.

Herr Dr. Tore Grünert für die geduldige Beantwortung aller Fragen zu TransIT.

Dem Team des Lehrstuhls für Produktion und Logistik der Universität Wien.