



**Tourenplanung für den Menübringdienst des
Deutschen Roten Kreuzes Magdeburg -
Eine Fallstudie**

HEIKE HAUSSNER, JESSICA KNAUEL,
GERHARD WÄSCHER

FEMM Working Paper No. 8, March 2007

F E M M

Faculty of Economics and Management Magdeburg

Working Paper Series

**Tourenplanung für den
Menübringdienst des Deutschen
Roten Kreuzes Magdeburg**

—

Eine Fallstudie

**Heike Haußner, Jessica Knauel,
Gerhard Wäscher**

Impressum:

Herausgeber:

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Wirtschaftswissenschaft
Der Dekan

V. i. S. d. P.: Heike Haussner
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Postfach 4120
39016 Magdeburg

Auflage: 90

Redaktionsschluß: März 2007

Herstellung: Dezernat Allgemeine Angelegenheiten,
Sachgebiet Reproduktion

Bezug über den Herausgeber

ISSN 1615-4274

Heike Haußner · Jessica Knauel · Gerhard Wäscher

Tourenplanung für den Menübringdienst des Deutschen Roten Kreuzes Magdeburg

—
Eine Fallstudie

März 2007

Zusammenfassung: Den Gegenstand dieser Arbeit bildet die Planung von Master-Touren für einen Menübringdienst des Deutschen Roten Kreuzes. Es wird untersucht, ob und ggf. in welchem Umfang bei der Belieferung der Kunden Rationalisierungspotentiale durch eine verbesserte Tourenplanung erschlossen werden können. Da nur einige wenige Zeitfensterrestriktionen zu beachten sind, wird das zugrunde liegende Tourenplanungsproblem zunächst unter teilweiser Vernachlässigung dieser Restriktionen (mit Hilfe eines exakten Ansatzes) gelöst. Anschließend wird eine Heuristik eingesetzt, mit der die ermittelte Lösung dahingehend überarbeitet wird, dass auch die letzten verbliebenen Verletzungen von Zeitfensterrestriktionen aufgehoben werden. Der zum Einsatz vorgeschlagene neue Master-Tourenplan erweist sich gegenüber dem aktuellen Plan als erheblich kürzer, und zwar sowohl im Hinblick auf die zurückzulegenden Entfernungen als auch in Bezug auf die dafür benötigte Zeit.

Schlagwörter: Tourenplanung, Master-Touren, Zeitfenster, Zeitbeschränkungen

Korrespondenzadresse:

Prof. Dr. Gerhard Wäscher
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Wirtschaftswissenschaft
Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre
- Management Science -
Postfach 4120
39016 Magdeburg
{gerhard.waescher@ww.uni-magdeburg.de}

Inhalt

Einleitung	1
1 Problemstellung und -analyse.....	1
2 Modellierung	2
3 Datenermittlung	5
3.1 Standorte	5
3.2 Kürzeste Wege und Entfernungen	6
3.3 Übergangszeiten.....	6
3.4 Maximale Tourlänge	8
3.5 Zeitfenster	8
3.6 Aktueller Master-Tourenplan.....	8
4 Lösungsansatz und Ergebnisse	10
4.1 Grundlegender Ansatz.....	10
4.2 Generierung von Tourenplänen.....	10
4.3 Diskussion.....	13
5 Ausblick.....	15

Einleitung

Das Deutsche Rote Kreuz (DRK) ist eine gemeinnützige Organisation, die auf mehreren Geschäftsfeldern tätig ist. Dazu gehören u.a. das Rettungswesen, Blutspendedienste und ein Suchdienst im Katastrophenfall. In einer Reihe von Städten in Deutschland bietet das DRK außerdem einen Menübringdienst an, der Kunden mit warmen Mahlzeiten beliefert. Die Tourenplanung für den Menübringdienst in Magdeburg bildet den Gegenstand dieser Arbeit. Es soll untersucht werden, ob und ggf. in welchem Umfang bei der Belieferung der Kunden Rationalisierungspotentiale durch eine verbesserte Tourenplanung erschlossen werden können.

In Kapitel 1 wird zunächst das Tourenplanungsproblem für den Menübringdienst des DRK Magdeburg beschrieben und präzisiert. Insbesondere wird herausgearbeitet, dass im Mittelpunkt der Planungsüberlegungen die Erstellung von Master-Tourenplänen steht, welche die Grundlage für die Ableitung der täglichen Auslieferungstouren bilden. Ein (allgemeines) Optimierungsmodell, das die vorgefundene Problemstruktur abbildet, wird in Kapitel 2 vorgestellt. Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Vorgehensweise zur Ermittlung der relevanten Problemdata.

Das zu lösende Optimierungsproblem gehört zwar zur Klasse der NP-schweren (und damit tendenziell nur mit hohem Rechenaufwand lösbaren) Probleme (vgl. Toth, Vigo 2002, S. 8), allerdings weist es im Zusammenhang mit der zu lösenden Planungsaufgabe nicht unbedingt eine Problemgröße auf, die von vornherein den Einsatz eines exakten, d.h. nach endlich vielen Schritten eine optimale Lösung liefernden Verfahrens ausschließt. Der hier gewählte Lösungsansatz, der den Einsatz von Standardsoftware der ganzzahligen Optimierung umfasst, wird zunächst in Kapitel 4 vorgestellt. Anschließend werden für die ermittelten Problemdata zwei (Master-) Tourenpläne generiert, die sich in Bezug auf die Gesamtlänge der Touren und die Einsatzzeiten der Auslieferungsfahrer unterscheiden. Die Diskussion macht deutlich, dass einer dieser Pläne erhebliche Vorzüge aufweist und deshalb in erster Linie für eine Realisierung in Betracht kommt. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf weiterführende Aspekte in Kapitel 5.

1 Problemstellung und -analyse

Seit 1990 bietet der Stadtverband Magdeburg des DRK einen Menübringdienst an, der registrierte Kunden vormittags mit warmen Mahlzeiten beliefert. Zum Zeitpunkt der Untersuchung (August 2006) bestand der Kundenstamm aus 69 Kunden. Allerdings ist nicht jeder dieser 69 Kunden täglich zu beliefern. Die Kunden geben vielmehr einmal pro Woche ihre Bestellung auf, in der sie festlegen, an welchen Tagen der kommenden Woche sie eine Mahlzeit erhalten wollen. Dabei können sie zwischen acht verschiedenen Menüs wählen. Durchschnittlich werden etwa 58 Kunden pro Tag beliefert.

Die Auslieferung erfolgt an jedem Tag in zwei Touren, für die jeweils ein Fahrzeug mit einem Fahrer zur Verfügung steht. Gegen 9:00 Uhr übernehmen die Fahrer die Mahlzeiten, prüfen diese dahingehend, ob sie mit den Bestellungen übereinstimmen und ob sie die richtige Temperatur aufweisen. Nach der Beladung der Fahrzeuge beginnen sie gegen 9:15 Uhr mit der Auslieferung. Mit der Rückkehr an den Standort der DRK-Geschäftsstelle Magdeburg (im Folgenden kurz "Depot" genannt) wird die Auslieferung üblicherweise zwischen 12:00 Uhr und 12:30 Uhr beendet.

Jeder Fahrer erhält zum Wochenbeginn einen aus einer Tour bestehenden (Wochen-) Tourenplan, der alle Kunden und deren Standorte umfasst, die von ihm in der betreffenden Woche mindestens einmal zu beliefern sind, und der angibt, in welcher Reihenfolge die Kunden anzufahren sind. Ein Kunde, der für einen bestimmten Tag der Woche kein Menü bestellt hat, wird an diesem Tag einfach übersprungen, ohne dass ansonsten die Belieferungsreihenfolge geändert wird.

Die Grundlage zur Bestimmung des Wochen-Tourenplans bildet ein aus zwei Touren bestehender Master-Tourenplan, in dem jeder der 69 Kunden genau einer der beiden Touren zugeordnet und ihre Belieferungsreihenfolge festgelegt ist. Eine Wochen-Tour unterscheidet sich von der betreffenden Master-Tour nur dadurch, dass Kunden, die in der betreffenden Woche nicht beliefert werden, darin nicht aufgeführt sind, die Belieferungsreihenfolge ansonsten aber unverändert bleibt. Ein neuer Master-Tourenplan ist insofern immer nur dann zu erstellen, wenn sich der Kundenstamm signifikant verändert hat.

Der starre Zusammenhang zwischen Master-Tourenplan, Wochen-Tourenplan und den tatsächlichen Auslieferungstouren hat sich in der Vergangenheit insofern bewährt, dass die Fahrer „ihre“ Touren schnell erlernen und somit unproduktive Zeiten zum Orientieren, Kartenlesen, Programmieren des Navigationssystems usw. entfallen. Grundsätzlich stellt sich aber die Frage, wie gut die zugrunde gelegten, mit Hilfe einer einfachen Tourenplanungs-Software ermittelten Master-Touren tatsächlich sind und ob hier nicht noch Kosteneinsparungsmöglichkeiten verborgen sind. Dies ist Gegenstand der folgenden Untersuchung.

Die Grundstruktur des geschilderten Problems entspricht dem sog. Vehicle Routing-Problem (VRP), einem Standardproblem des Operations Research. Insofern liegt es nahe zu prüfen, ob eine durch OR-Methoden gestützte Tourenplanung zu einer besseren Lösung (Master-Touren) führt. Angestrebt wird ein Master-Tourenplan, der aus zwei Touren besteht und eine möglichst geringe Gesamtlänge aufweist. Die Leiterin der DRK-Geschäftsstelle hielt es weiterhin für wünschenswert, dass die beiden Touren in etwa gleich lang sind, damit eine gleichmäßige Auslastung der Fahrer gewährleistet ist.

Dabei ist zu beachten, dass einige (wenige) Kunden aufgrund medizinischer Indikationen innerhalb eines ganz bestimmten Zeitrahmens (Zeitfenster) beliefert werden müssen. Die Belieferung sollte im Übrigen so früh wie möglich, aber nicht später als bis 12:30 Uhr abgeschlossen sein.

2 Modellierung

Das geschilderte Auslieferungsproblem besitzt die Struktur eines „Capacitated Vehicle Routing Problem“ (vgl. Toth, Vigo 2002, S. 5 ff.). Die Kapazitätsbeschränkungen beziehen sich dabei auf die maximal für jede Tour zur Verfügung stehende Zeit. Dementsprechend sei es im Folgenden genauer als „Time-Constrained Vehicle Routing Problem“ (TCVRP) bezeichnet.

Weiterhin handelt es sich um ein Tourenplanungs-Problem mit Zeitfenstern. Da aber in dem konkreten Fall nur sehr wenige Zeitfenster zu beachten sind, bietet es sich an, diese bei der Bestimmung eines Master-Tourenplans zunächst zu vernachlässigen und das zugrunde liegende TCVRP (also ohne die betreffenden Zeitfensterrestriktionen) zu lösen. Anschließend ist die erhaltene Lösung darauf hin zu untersuchen, ob sie die Restriktionen erfüllt oder nicht.

Sollte das nicht der Fall sein, kann man die Touren durch einfache (heuristische) Operationen so modifizieren, dass man einen zulässigen Tourenplan erhält.

Für die Modellierung des TCVRP seien zunächst die folgenden Symbole eingeführt:

Indexmengen

V : Indexmenge der n Kundenstandorte ($i = 1, 2, \dots, n$) und des Depots ($i = 0$), d.h. $V = \{0, 1, 2, \dots, n\}$; V wird im Folgenden zu Vereinfachung des Sprachgebrauchs als *Menge der Standorte* oder als *Standortmenge*, deren Elemente als *Standorte* bezeichnet;

K : Indexmenge der Touren / Fahrzeuge, $K = \{1, 2, \dots, m\}$.

Konstante

c_{ij} : Kosten des Übergangs vom Standort i zum Standort j ($i, j \in V$);

t_{ij} : Übergangszeit; Zeitbedarf (in Zeiteinheiten) für den Übergang vom Standort i zum Standort j ($i, j \in V$);

T : maximale Tourlänge (in Zeiteinheiten).

Variablen

x_0 : Zielvariable, Gesamtkosten der Belieferung;

x_{ijk} : Binärvariable mit

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Kunde } j \text{ auf der Tour } k \text{ direkt nach Kunde } i \text{ beliefert wird,} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{für } i, j \in V, k \in K;$$

y_{ik} : Binärvariable mit

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Kunde } j \text{ auf der Tour } k \text{ beliefert wird,} \\ 0, & \text{sonst;} \end{cases} \quad \text{für } i \in V, k \in K;$$

In Anlehnung an Toth und Vigo (2002, S. 15) lässt sich das TCVRP mit Hilfe des folgenden Optimierungssystems modellieren:

- (1)
$$\min x_0 = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} \sum_{k \in K} x_{ijk}$$
- (2)
$$\sum_{k \in K} y_{ik} = 1 \quad \text{für } i \in V \setminus \{0\};$$
- (3)
$$\sum_{k \in K} y_{0k} = |K|;$$
- (4)
$$\sum_{j \in V} x_{ijk} = \sum_{j \in V} x_{jik} = y_{ik} \quad \text{für } i \in V, k \in K;$$
- (5)
$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} t_{ij} x_{ijk} \leq T \quad \text{für } k \in K;$$
- (6)
$$\sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} x_{ijk} \geq y_{hk} \quad \text{für } S \subseteq V \setminus \{0\}, h \in S, k \in K;$$
- (7)
$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \text{für } i \in V, k \in K;$$
- (8)
$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \text{für } i, j \in V, k \in K.$$

Zielfunktion und Zielvorschrift (1) fordern eine Minimierung der gesamten Kosten x_0 der Belieferung. Dabei ist der Begriff „Kosten“ nicht im engen betriebswirtschaftlichen Sinn zu verstehen, sondern allgemein als eine zu minimierende Zielgröße, die im Zusammenhang mit der gewählten Kundenreihenfolge steht und die sich additiv aus den „Kosten“ c_{ij} ergibt, die bei dem Übergang von einem Kundenstandort bzw. vom Depot zu einem anderen Standort entstehen. Als Maßgröße für derartige Kosten kommt vor allem die Zeit in Betracht, die für den Übergang von einem Kundenstandort / Depot i zu einem Kundenstandort / Depot j benötigt wird, oder aber – wie im vorliegenden Fall – die in diesem Zusammenhang zurückzulegende Entfernung.

Die Restriktionen (2) bewirken, dass jeder Kundenstandort genau einmal besucht wird und jeder Kunde genau einer Tour zugeordnet wird. Durch die Restriktion (3) ist die Anzahl $|K|$ der Touren im zu ermittelnden Tourenplan festgelegt. Die Restriktionen (4) bewirken, dass das gleiche Fahrzeug, das den Kundenstandort anfährt, diesen auch wieder verlässt. (5) beschränkt die Länge jeder Tour (gemessen in Zeiteinheiten) auf eine maximale Länge T . Schließlich sichern die Restriktionen (6), dass die zu bestimmenden Touren des Tourenplans auch zusammenhängen. Sie können auch durch Subtour-Eliminationsrestriktionen (vgl. Fisher, Jaikumar 1981, S. 111) ersetzt werden.

Das Optimierungsproblem (1) – (8) ist NP-schwer (vgl. Toth, Vigo 2002, S. 8), deshalb kann nicht damit gerechnet werden, dass größere Probleme sich in angemessener Rechenzeit (optimal) lösen lassen. Andererseits erscheinen die hier zu lösenden Tourenplanungsprobleme aber auch nicht als so groß, dass von vornherein die Lösung mit exakten Lösungsverfahren ausgeschlossen wäre.

3 Datenermittlung

In Bezug auf das Auslieferungsproblem des DRK Magdeburg ist die Anzahl der Touren mit $|K| = 2$ fest vorgegeben. Dann werden zur Spezifizierung des Optimierungssystems (1) – (8) weiterhin folgende Daten benötigt: (a) Standorte der Kunden und des Depots, (b) kürzeste Wege zwischen den Standorten und ihre Längen (Entfernungen), (c) Übergangszeiten, (d) maximale Tourlänge, (e) Zeitfenster.

3.1 Standorte

Die Kundenstandorte bzw. die Lage des Depots werden zur Bestimmung der kürzesten Wege zwischen diesen Standorten und deren Längen (Entfernungen) benötigt. Der Bestand an Kunden und ihre jeweiligen Standorte lassen sich unmittelbar aus den Geschäftsunterlagen des DRK entnehmen. Sie sind in der Tab. A-1 im Anhang zusammengestellt. Zwei Kunden befinden sich an demselben Standort (Standort Nr. 46), so dass insgesamt $n = 68$ Kundenstandorte bzw. $|V| = 69$ Standorte zu berücksichtigen sind. Abb. 1 zeigt eine Übersichtskarte der Stadt Magdeburg, in der die Standorte der Kunden (als Kreise) sowie die Lage des Depots (als Quadrat) dargestellt sind.

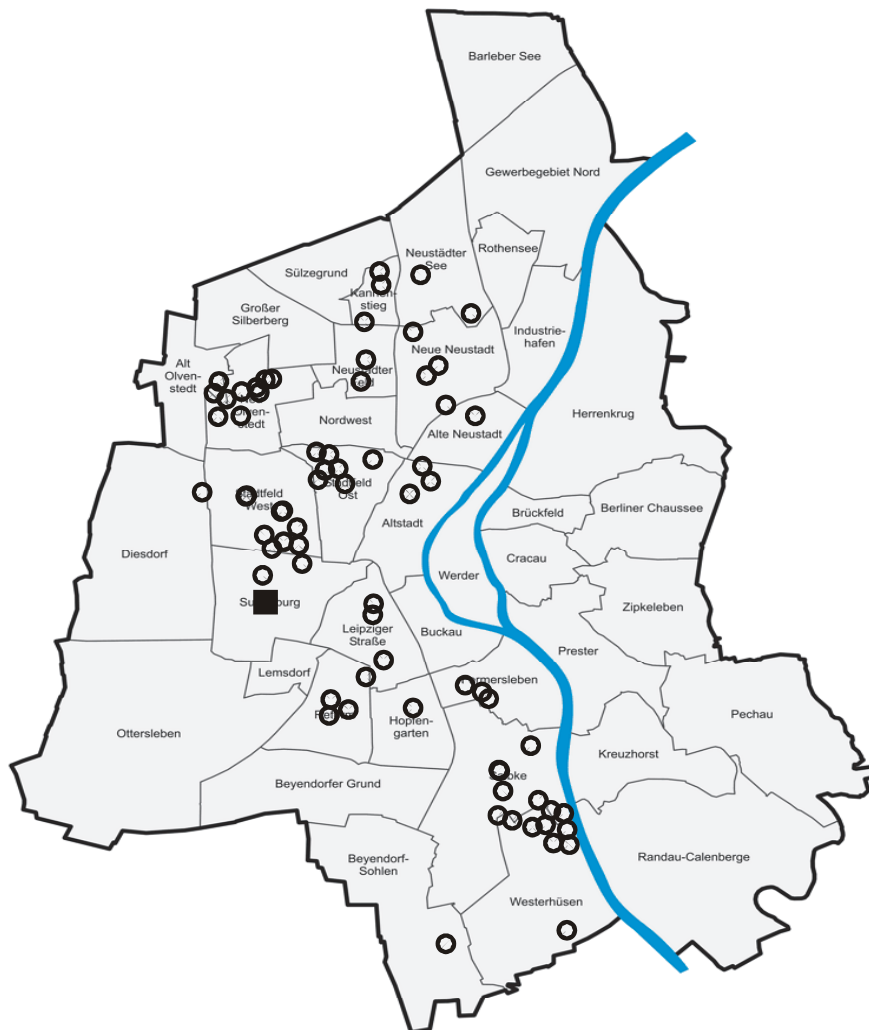


Abb. 1: Kundenstandorte und Lage des Depots *

* Die Übersichtskarten in dieser Arbeit werden verwendet mit freundlicher Genehmigung von Jörg Schönebaum.

3.2 Kürzeste Wege und Entfernungen

Als Maßgröße für die Kosten c_{ij} in (1) soll hier – wie bereits angemerkt – die zwischen den Standorten der Rundreisen zurückzulegende *Entfernung* (in Metern) zugrunde gelegt werden. Die Entfernung von einem Standort i zu einem Standort j ist dabei definiert als die Länge eines kürzesten Wegs von i nach j ; der Begriff der Entfernung beinhaltet also bereits, dass ein kürzester Weg von i nach j bestimmt wurde und stets nur ein solcher Weg benutzt wird. x_0 ist dementsprechend die Gesamtlänge aller Touren des Tourenplans.

Zur Ermittlung der relevanten Größen c_{ij} müssen nun nicht die Entfernungen für sämtliche $((n + 1) \times (n + 1)) = 69 \times 69 = 4.761$ Paare (i, j) von Standorten explizit gemessen werden. Vielmehr reicht es aus, für jeden Standort die dazu gehörenden Nachbarstandorte und die betreffenden Entfernungen zu identifizieren. Ein zu einem Standort i gehörender Nachbarstandort ist in diesem Zusammenhang als ein Standort definiert, der sich auf einem kürzesten Weg von i aus unmittelbar erreichen lässt, d.h. bei dem der betreffende kürzeste Weg nicht über einen dritten Standort führt. Die Menge der zu einem Standort i gehörenden Nachbarstandorte ist in städtischen Verkehrsnetzen üblicherweise sehr klein und lässt sich – etwa anhand von Stadtplänen – leicht bestimmen. Für alle Standorte und die dazugehörigen Nachbarstandorte ermittelt bzw. misst man zunächst die jeweilige Entfernung. Mit Hilfe des Tripel-Algorithmus (auch: Floyd-Algorithmus; vgl. etwa Domschke, Drexl 2005, S. 76-77) lassen sich dann die kürzesten Wege zwischen allen Standorten und die zugehörigen Entfernungen mit polynomialem Rechenaufwand ($O(n^3)$, vgl. Grünert, Irnich 2005, S. 290) ermitteln.

Für die Ermittlung der Entfernungen von den Standorten zu den jeweiligen Nachbarstandorten wurde auf den frei verfügbaren Routenplaner von Falk (<http://www.falk.de>) zurück gegriffen. Es stellte sich heraus, dass einige Kundenadressen nicht exakt zugeordnet werden konnten und deshalb Ausweichadressen genutzt werden mussten. In einigen Fällen (etwa in verwinkelten Neubaugebieten) mussten auch manuelle Korrekturen vorgenommen werden, weil die Lage des tatsächlichen Standorts erheblich von der im Routenplaner verwendeten Lage abwich. Die Anwendung des Tripel-Algorithmus lieferte schließlich die benötigten kürzesten Wege und Entfernungen für alle Paare von Standorten. Die Entfernungsmatrix und die zugehörige Wegematrix, aus der sich die kürzesten Wege konstruieren lassen, können unter http://www.uni-magdeburg.de/mansci/rm/drk_tourenplanung/ eingesehen werden.

3.3 Übergangszeiten

Die *Übergangszeit* t_{ij} lässt sich hier als diejenige Zeit definieren, die vom Abschluss der Auslieferung am Standort i bis zum Abschluss der Auslieferung am Standort j vergeht. Sie setzt sich zusammen aus der *Fahrtzeit* f_{ij} vom Standort i zum Standort j , aus der *Wegezeit* w_j , die der Fahrer für den Fußweg vom Parkplatz des Auslieferungsfahrzeugs bis zur Haustür des Kunden j benötigt, aus der *Zugangszeit* z_j für den Weg von der Haustür zur Wohnungstür sowie aus der *Aufenthaltszeit* a_j beim Kunden. Die zuletzt genannte Zeitkomponente ist die Zeit, die der Auslieferungsfahrer an der Wohnungstür bzw. in der Wohnung des Kunden bei der Übergabe der Mahlzeit verbringt. Die Übergangszeit ergibt sich dementsprechend wie folgt:

$$(9) \quad t_{ij} = f_{ij} + 2(w_j + z_j) + a_j \quad \text{für alle } i, j \in V.$$

Wege- und Zugangszeit gehen doppelt in die Berechnung ein, da die entsprechenden Zeiten zweimal, nämlich jeweils auf dem Hin- und dem Rückweg zwischen Parkplatz und Kunden, anfallen.

Bei der Ermittlung der Fahrtzeiten f_{ij} wurde eine proportionale Beziehung zwischen Entfernung und Fahrtzeit unterstellt. An mehreren Tagen wurden die zurückgelegten Entfernungen und die zugehörigen, tatsächlich realisierten Fahrtzeiten aufgenommen und daraus eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 27 km/h bzw. 7,5 m/sec ermittelt, was 0,13 Sekunden pro Meter entspricht. Durch Multiplikation der zuvor ermittelten Entfernungen mit diesem Faktor ergeben sich die zugehörigen Fahrtzeiten f_{ij} .

Im Zusammenhang mit der Bestimmung der Wegezeiten w_j als auch der Zugangszeiten z_j wurde vereinfachend eine Klasseneinteilung vorgenommen, bei der jeweils drei Zeitaufwands- bzw. Schwierigkeitsklassen unterschieden wurden: „kurz“, „mittellang“, „lang“ bzw. „leicht“, „mittelschwer“, „schwer“. Die konkreten Klassendefinitionen sowie die zugehörigen Prozesszeiten (in Sekunden) können der Tab. 1 entnommen werden. Die Prozesszeiten repräsentieren dabei wiederum Durchschnittswerte, die sich bei einer Erhebung der tatsächlich realisierten Zeiten ergaben.

Merkmal	Merkmalsklasse	Klassengrenzen	Prozesszeiten [sec]
Fußweg	kurz	bis unter 10 m	20
	mittellang	10 m bis unter 40 m	38
	lang	40 m und länger	62
Zugang	leicht	Erdgeschoss	9
	mittelschwer	1. und 2. Etage	36
	schwer	3. Etage und höher	73

Tab. 1: Klasseneinteilung und zugehörige Prozesszeiten für Fußweg und Zugang

Die Aufenthaltszeiten a_j wurden im Durchschnitt mit 17 Sekunden ermittelt, d.h. hier wurde jeweils mehr oder weniger nur das Tablett mit der Mahlzeit an der Wohnungstür übergeben. Bei zwei Kunden (Nr. 28 und 48) wurde allerdings – medizinisch begründet – ein erheblich längerer Aufenthalt festgestellt. Dies machte eine explizite Korrektur der betreffenden Aufenthaltszeiten erforderlich, die dann jeweils mit 120 Sekunden angesetzt wurden.

Eine weitere Korrektur war in Bezug auf die Zugangs- und die Aufenthaltszeit des Standorts Nr. 46 erforderlich, da dort zwei Kunden wohnen. Hier wurde bei der Festlegung der Zugangszeit lediglich der Kunde berücksichtigt, der in der höheren Etage wohnt. Weiterhin wurde die Aufenthaltsdauer verdoppelt.

Betrachtet man in (9) lediglich die am Standort j anfallenden Zeitkomponenten, so erhält man die sog. *Servicezeit* s_j am Standort j :

$$(10) \quad s_j = 2(w_j + z_j) + a_j \quad \text{für alle } j \in V.$$

Die Servicezeiten für die 68 Kundenstandorte sind in der Tab. A-2 im Anhang dargestellt. Die sich aus den so ermittelten Fahr-, Wege- und Servicezeiten bestimmte Matrix der Übergangszeiten ist ebenfalls auf der angegebenen Website einsehbar.

3.4 Maximale Tourlänge

Die Auslieferung an die Kunden sollte idealerweise bis 12:00 Uhr, spätestens aber bis 12:30 Uhr abgeschlossen sein. Die an den einzelnen Tagen zu absolvierenden Touren umfassen allerdings nur einen Teil des in den zu bestimmenden Master-Touren enthaltenen Kundenstamms. Für die Planung der Master-Touren kann deshalb ein größerer Zeitrahmen unterstellt werden. Als Obergrenze für die Beendigung der Master-Touren wurde dementsprechend zunächst 13:00 Uhr angesetzt. Die sich unter dieser Zeitrestriktion ergebenden Master-Touren sind später dahingehend zu überprüfen, ob sie in der täglichen Auslieferung auch tatsächlich zu Touren führen, die der vorgesehenen Beendigungszeit genügen.

Geht man davon aus, dass die Auslieferungsfahrer ihre Touren um 9:15 Uhr beginnen, so kann der zur Verfügung stehende Zeitrahmen für die Auslieferung in Bezug auf die Master-Touren mit 3:45 Stunden angesetzt werden, was $T = 13.550$ [sec] entspricht.

3.5 Zeitfenster

Wie dargestellt, sind bei der Auslieferung an einige wenige Kunden Zeitrestriktionen zu beachten. Diese Kunden bzw. deren Standorte und die jeweiligen Zeitfenster sind in der Tab. 2 aufgeführt.

Standort-Nr.	Belieferungszeitraum
1	09:15 Uhr – 10:00 Uhr
42	09:15 Uhr – 11:00 Uhr
68	11:00 Uhr – 12:30 Uhr

Tab. 2: Zeitfenster für die Auslieferung

3.6 Aktueller Master-Tourenplan

Der für den gegebenen Kundenstamm zum Untersuchungszeitpunkt vom DRK Magdeburg genutzte (Master-) Tourenplan („aktueller“ Master-Tourenplan) ist in Tafel 1 und in Abb. 2 dargestellt. Er besitzt eine Länge von 106,026 km. Zu seiner Abwicklung werden insgesamt 24.108 Sekunden (das entspricht 6 Stunden und 41,8 Minuten) benötigt.

Master-Tour 0.1	
0 – 1 – 3 – 2 – 5 – 4 – 6 – 7 – 8 – 9 – 10 – 11 – 12 – 13 – 14 – 15 – 17 – 16 – 19 – 20 – 18 – 21 – 25 – 26 – 27 – 28 – 32 – 33 – 34 – 31 – 29 – 30 – 35 – 24 – 23 – 22 – 36 – 37 – 38 – 39 – 41 – 40 – 0	
Länge der Tour [m]: 60.081;	benötigte Zeit [sec]: 13.275 (12:56 Uhr)
Master-Tour 0.2	
0 – 42 – 43 – 44 – 45 – 46 – 47 – 48 – 49 – 51 – 50 – 52 – 54 – 53 – 55 – 56 – 57 – 58 – 59 – 60 – 61 – 62 – 63 – 64 – 65 – 66 – 67 – 68 – 0	
Länge der Tour [m]: 45.945;	benötigte Zeit [sec]: 10.833 (12:16 Uhr)

Tafel 1: Aktueller Master-Tourenplan (Tourenplan 0)

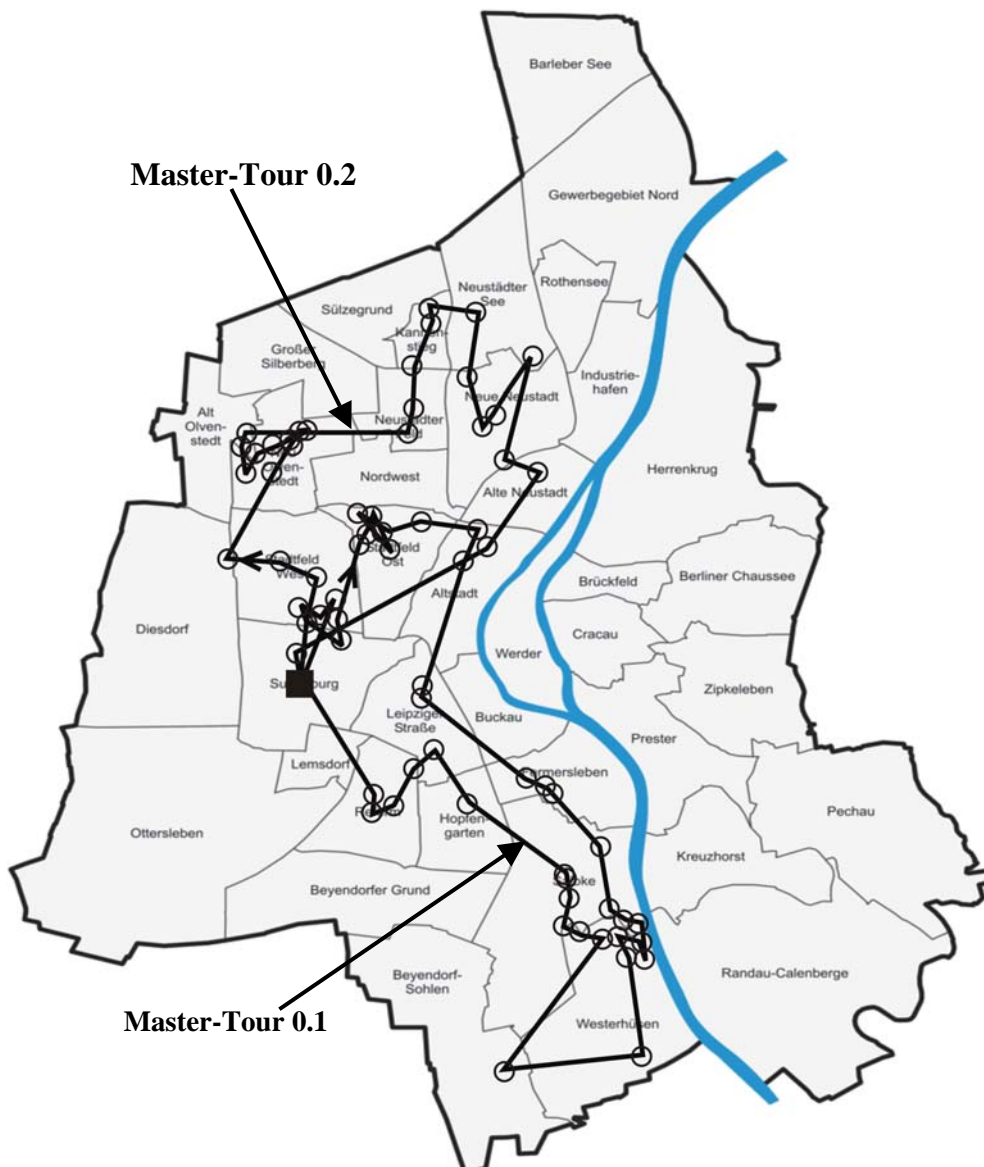


Abb. 2: Aktueller Master-Tourenplan (Tourenplan 0)

4 Lösungsansatz und Ergebnisse

4.1 Grundlegender Ansatz

Der für die Lösung des Auslieferungsproblems des DRK gewählte Lösungsansatz beruht auf der Grundidee, dass man – wegen ihrer geringen Anzahl - zunächst von den Zeitfensterrestriktionen absieht und das entsprechende TCVRP löst. Dies kann grundsätzlich etwa durch den Einsatz von Software der linearen bzw. ganzzahligen Optimierung geschehen. Das führt jedoch insofern zu Schwierigkeiten, wie sich die Restriktionen des Typs (6) kaum vorab vollständig formulieren lassen. Man kann allerdings so vorgehen, dass man zunächst auf diese Restriktionen verzichtet und das so relaxierte TCVRP löst. Dies bereitet in Bezug auf die hier relevante Problemgröße keine besonderen Schwierigkeiten, allerdings sollte sich die generierte Lösung in Bezug auf das zugrunde liegende, vollständige TCVRP üblicherweise als unzulässig erweisen, da damit gerechnet werden kann, dass sie neben zweier, im Depot beginnender und endender Touren noch weitere, nicht mit dem Depot verbundene Touren (auch *Subtours* oder *Kurzzyklen* genannt) e

nthält. Man formuliert nun diejenigen Restriktionen des Typs (6), die gerade diese Subtours ausschließen, fügt sie dem bisher gelösten Optimierungssystem hinzu und löst es erneut. Die Schritte werden solange wiederholt, bis man eine in Bezug auf das vollständige TCVRP zulässige Lösung erhalten hat.

Diese Lösung repräsentiert einen (hier aus zwei Touren bestehenden) Tourenplan, in dem jedoch möglicherweise noch Zeitfensterrestriktionen verletzt sind. Diese Verletzungen lassen sich dann etwa auf heuristischem Wege durch ein einfaches „Remove and Insert“ beheben, d.h. man nimmt einen Standort, dessen Zeitfensterrestriktion verletzt ist, aus der betreffenden Tour heraus und fügt ihn an einer anderen Stelle wieder ein, die in Bezug auf das Zeitfenster zulässig ist und an der sich die geringste Zielwertverschlechterung ergibt (Cheapest Insertion). In Tafel 2 ist der geschilderte Lösungsansatz noch einmal systematisch zusammengefasst.

Zur Erstellung des Optimierungsmodells wurde die Modellierungssprache AMPL, als Optimierungssoftware CPLEX 7.1 verwendet. Alle Rechnungen wurden auf einem AMD Athlon 2800+ (Rechnerleistung: 2,08 GHz, 524 MB RAM) durchgeführt.

4.2 Generierung von Tourenplänen

Bei einem ersten Lösungsversuch zeigte sich bereits, dass die Kunden Nr.1 und Nr. 42 ganz an das Ende einer Tour gesetzt würden. Da andererseits keine Auslieferungstour vor 11:00 Uhr beendet sein wird, würde dadurch das Zeitfenster, das für die Belieferung dieser Kunden zur Verfügung steht, verletzt werden. Um zu verhindern, dass die zu erzeugenden Lösungen gerade diese Merkmale aufweisen, wurden vorab

$$c_{1,0} = M \text{ und } c_{42,0} = M$$

(M: hinreichend große Zahl) gesetzt. Mit einer ähnlichen Überlegung lässt sich in Bezug auf den Kunden Nr. 68, der nach 11:00 Uhr beliefert werden soll,

$$c_{0,68} = M$$

setzen.

Schritt 1

- (1.1) Löse das in Bezug auf die Restriktionen (6) relaxierte TCVRP!
- (1.2) Besitzt die Lösung Subtouren, so gehe zu Schritt 2, andernfalls zu Schritt 3!

Schritt 2

- (2.1) Ergänze das bisher vorliegende Optimierungssystem um diejenigen Restriktionen des Typs (6), die gerade die in der vorliegenden Lösung enthaltenen Subtouren ausschließen!
- (2.2) Löse das ergänzte Optimierungssystem!
- (2.3) Besitzt die Lösung Subtouren, so wiederhole (2.1) und (2.2)!

Schritt 3

- (3.1) Sind in der Lösung Zeitfensterrestriktionen verletzt, so wende eine Heuristik an, mit der die Lösung zulässig wird!
- (3.2) STOP!

Tafel 2: Lösungsansatz für das Auslieferungsproblem des DRK

Die Lösung des TCVRP führte zu dem in Tafel 3 und in Abb. 3 dargestellten Tourenplan. Tab. 3 macht den Rechenaufwand deutlich, der im Zusammenhang mit dem sukzessiven Ausschluss der Kurzzyklen entstand.

Master-Tour 1.1	
0 – 42 – 1 – 2 – 3 – 43 – 44 – 45 – 52 – 54 – 53 – 51 – 50 – 49 – 48 – 47 – 46 – 11 – 55 – 56 – 57 – 58 – 59 – 60 – 61 – 64 – 63 – 62 – 65 – 66 – 14 – 15 – 67 – 13 – 10 – 12 – 8 – 7 – 9 – 6 – 4 – 5 – 0	
Länge der Tour [m]: 48.981;	benötigte Zeit [sec]: 13.220 (12:55 Uhr)
Master-Tour 1.2	
0 – 17 – 16 – 37 – 38 – 19 – 20 – 18 – 21 – 25 – 26 – 27 – 28 – 33 – 32 – 29 – 31 – 34 – 35 – 30 – 24 – 23 – 22 – 36 – 39 – 41 – 40 – 68 – 0	
Länge der Tour [m]: 41.452;	benötigte Zeit [sec]: 8.808 (11:42 Uhr)

Tafel 3: Tourenplan minimaler Länge (Tourenplan 1)

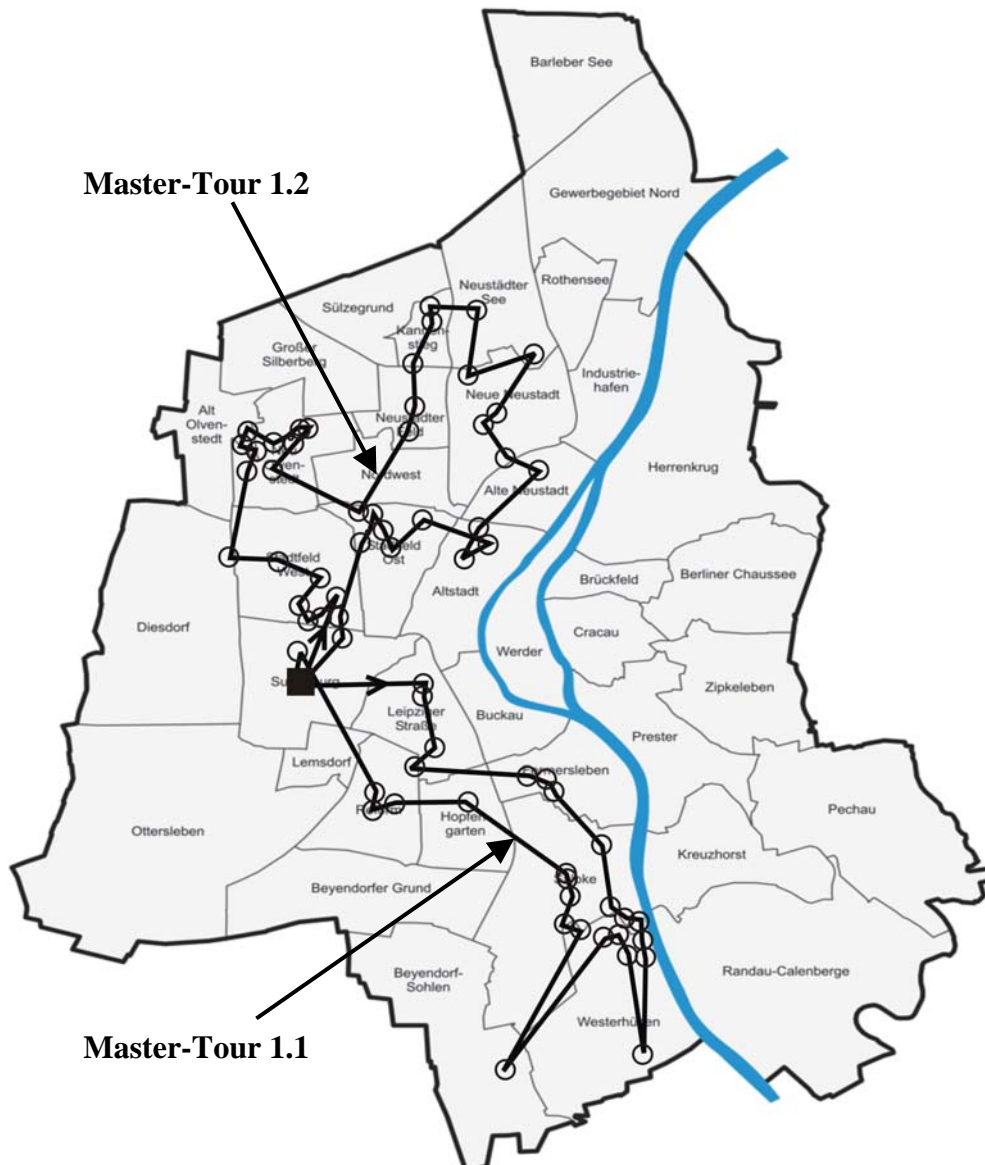


Abb. 3: Tourenplan minimaler Länge (Tourenplan 1)

Iteration	Zielfunktionswert [m]	Dauer [sec]	Anzahl Simplex-Iterationen	Anzahl B&B-Knoten	Anzahl Kurzzyklen
Relaxation	73.263	0,53	247	4	29
1	80.956	2,50	1.442	2	16
2	85.837	12,00	2.611	79	6
3	87.036	160,00	107.298	7.772	6
4	87.606	750,00	460.686	15.973	6
5	88.476	170,00	84.130	2.129	1
6	88.858	340,00	146.798	3.028	1
7	89.128	9,30	3.137	0	1
8	89.833	8,60	2.947	0	1
9	90.433	48,00	4.409	27	0

Tab. 3: Rechenaufwand und Iterationen zur Bestimmung eines (Master-) Tourenplans minimaler Länge

Die beiden Master-Touren sind vor 13:00 Uhr beendet und erfüllen auch die Zeitfensterrestriktionen der drei Kunden Nr. 1, 42 und 68; sie repräsentieren also einen zulässigen Tourenplan für das zugrunde liegende Problem. Die Master-Tour 1.1 hat eine Gesamtlänge von 48,983 km und eine Gesamtdauer von 13.220 Sekunden, was einer Ankunftszeit im Depot von 12:55 Uhr entspricht. Master-Tour 1.2 hat eine Länge von 41,452 km und dauert 8808 Sekunden. Sie ist um 11.42 Uhr beendet.

Es wird deutlich, dass die beiden Touren zu sehr unterschiedlichen Endzeitpunkten führen. In einem weiteren Schritt wurde deshalb versucht, zwei – hinsichtlich ihres Zeitbedarfs – ausgeglichene Master-Touren zu finden. Hierzu wurde in der Zeitrestriktion (5) der zur Verfügung stehende Zeitrahmen auf $T = 12.600$ reduziert, was einem Endzeitpunkt von 12:45 Uhr entspricht. Master-Tour 1.1 wird damit unzulässig.

Die Ermittlung einer optimalen Lösung des zugehörigen TCVRP gestaltete sich aufwendiger, da die Zeitrestriktion nun sehr stark bindend wirkt. Es konnte dennoch – wenn auch mit größerem Zeitaufwand – wieder eine optimale Lösung gefunden werden. Der ermittelte Tourenplan (hier nicht angegeben) war jedoch in Bezug auf die Zeitfensterrestriktionen für die Kunden Nr. 1 und Nr. 42 nicht zulässig. Deshalb wurden diese Kunden, die beide der Tour 2 zugeordnet waren, wieder herausgelöst und – gemäß dem Cheapest-Insertion-Verfahren (vgl. Reinelt 1994, S. 83) – jeweils dort wieder (in die Tour 2) eingefügt, wo sich die geringste Verlängerung der Tour ergab. Die Länge der Tour erhöht sich dadurch um 2,969 km auf 47,892 km, ihr Zeitbedarf steigt um 230 Sekunden auf 10.015 Sekunden, was einer neuen (zulässigen) Endzeit für diese Tour von 12:02 Uhr entspricht. Den neuen Tourenplan (Tourenplan 2) zeigt Tafel 4.

Master-Tour 2.1	
0 – 43 – 44 – 45 – 52 – 54 – 53 – 50 – 51 – 49 – 48 – 47 – 46 – 11 – 55 – 56 – 57 – 58 – 59 – 60 – 61 – 64 – 63 – 62 – 65 – 66 – 14 – 15 – 67 – 13 – 10 – 12 – 9 – 8 – 7 – 6 – 4 – 5 – 0	
Länge der Tour [m]: 48.078	benötigte Zeit [sec]: 12.583 (12:45 Uhr)
Master-Tour 2.2	
0 – 1 – 42 – 40 – 41 – 39 – 38 – 36 – 22 – 23 – 24 – 30 – 35 – 34 – 31 – 29 – 32 – 33 – 28 – 27 – 26 – 25 – 21 – 18 – 20 – 19 – 37 – 17 – 16 – 3 – 2 – 68 – 0	
Länge der Tour [m]: 47.892	benötigte Zeit [sec]: 10.015 (12:02 Uhr)

Tafel 4: Tourenplan mit zeitlich besser ausgeglichenen Touren (Tourenplan 2)

4.3 Diskussion

Gegenüber dem aktuellen Master-Tourenplan erweisen sich die beiden neu ermittelten Tourenpläne als erheblich kürzer, und zwar sowohl im Hinblick auf die zurückzulegenden Entfernungen als auch in Bezug auf die dafür benötigte Zeit. Für den ersten neu berechneten Tourenplan (Tourenplan 1) beträgt die Gesamtlänge beider Touren nur noch 90,433 km, die dafür benötigte Zeit 22.028 Sekunden (6 Stunden und 7,1 Minuten). Für den im Hinblick auf eine gleichmäßigere Fahrerauslastung entwickelten Tourenplan 2 ergibt sich entsprechend 95,970 km und 22.598 Sekunden (6 Stunden und 16,6 Minuten).

Bei Realisierung des ersten Plans ergäbe sich – gegenüber dem aktuellen Tourenplan 0 – also eine Einsparung in Bezug auf die zu erbringende Fahrleistung von 15,6 km (14,7 Prozent). Unterstellt man gemäß der ADAC-Kostentabelle für den vom DRK Magdeburg auf beiden Touren eingesetzten VW Caddy (Kastenwagen 2.0 SDI) einen Satz an variablen Kosten von 0,28 € pro km, so lassen sich – bei 365 Auslieferungstagen pro Jahr – daraus jährliche Einsparungen von 1.594,32 € hochrechnen. Dies ist für das DRK Magdeburg ein durchaus ansehnlicher Betrag. Dabei ist nicht einmal berücksichtigt, dass auch die Auslieferungsfahrer möglicherweise pro Tag nur eine geringere Anzahl von Stunden eingesetzt werden müssen und die entsprechenden Personalkosten sich ggf. verringern würden.

Bei dem zweiten neu ermittelten Tourenplan (Tourenplan 2) sind die Auswirkungen geringer. Die Kilometerleistung pro Tag geht – gegenüber dem aktuellen Master-Tourenplan – lediglich um 10,1 km (9,5 Prozent) zurück, was einer jährlichen Einsparung von 1.032,22 € entspricht. Eine gleichmäßigere Auslastung der Fahrer muss also mit einer signifikant geringeren Reduzierung der Fahrzeugkosten „erkauft“ werden. Diese Erkenntnis führte zu dem Entschluss, das Ziel einer möglichst gleichmäßigen Auslastung der Fahrer bzw. Fahrzeuge nicht weiter zu verfolgen und eine Realisierung des Tourenplans 1 anzustreben.

Es sei an dieser Stelle daran erinnert, dass es sich bei den Touren der neu generierten Tourenpläne (wie auch bei denjenigen des aktuellen Tourenplans) um Master-Touren handelt. Damit verbleibt zu prüfen, ob sich speziell auf der Grundlage des zur Realisierung vorgesehenen (Master-) Tourenplan 1 im Rahmen des vom DRK praktizierten Planungsablaufs tatsächlich zulässige, tagesbezogene Auslieferungstouren ergeben. Genauer formuliert: Für die Planung der Master-Touren des Tourenplans 1 wurde 13:00 Uhr als (hypothetische) Zeitobergrenze für die Rückkehr der Fahrzeuge ins Depot unterstellt. Streicht man zur Ermittlung der tagesbezogenen Auslieferungstouren aus diesen Master-Touren einfach die jeweils nicht zu beliefernenden Kunden, ist dadurch gewährleistet, dass sämtliche Kunden bis 12:30 Uhr beliefert werden?

In diesem Zusammenhang erübrigt sich eine genauere Analyse für die zweite Tour (1.2), da für diese – schon als Master-Tour – lediglich 41.452 Sekunden benötigt werden, was einem Zeitpunkt der Rückkehr ins Depot von 11:42 Uhr entspricht. Diese Tour kann also im Hinblick auf die vorgegebene Zeitobergrenze für die Belieferung der Kunden nicht kritisch werden. Anders sieht es dagegen für die Master-Tour 1.1 aus, für die ein (hypothetischer) Rückkehrzeitpunkt von 12:55 Uhr ermittelt wurde. Für diese Tour wurde deshalb anhand der Daten einer eher durch eine große Kundenzahl charakterisierte Kalenderwoche (34. KW, 14.-20.08.2006) geprüft, wann die täglichen Auslieferungsfahrten beendet werden. Das Ergebnis ist in Tab. 4 dargestellt.

Master-Tour 1.1	14.08.	15.08.	16.08.	17.08.	18.08.	19.08.	20.08.
Dauer [sec]	11.608	11.680	11.255	10.950	11.712	9.909	9.076
Ankunft beim letzten Kunden	12:28 Uhr	12:29 Uhr	12:22 Uhr	12:17 Uhr	12:30 Uhr	11:59 Uhr	11:46 Uhr

Tab. 4: Dauern und Beendigungszeitpunkte für die sich aus der Master-Tour 1.1 ergebenden Auslieferungstouren

Die Beendigungszeitpunkte der Auslieferungstouren liegen zwischen 11:46 Uhr und 12:30 Uhr. Sie repräsentieren die Zeitpunkte der Ankunft beim letzten Kunden der betreffenden Auslieferungstour. Es wird also tatsächlich kein Kunde nach 12:30 Uhr beliefert.

Schließlich stellt sich die Frage, ob sich die auf der Grundlage der Master-Touren für den Tourenplan 1 prognostizierten Einsparungen auch für die täglichen Auslieferungsfahrten aufzeigen lassen. Tab. 5 stellt die Fahrleistungen gegenüber, die auf der Grundlage des aktuellen bzw. des neu ermittelten Tourenplans 1 an den einzelnen Wochentagen der ausgewählten Referenzwoche (34. KW) zu erbringen sind. Die Einsparungen sind nahezu mit den für die Master-Touren berechneten Werten identisch. Bei einer Realisierung des Tourenplans 1 sind die Auslieferungstouren um etwa 15,7 km pro Tag (16,1 Prozent) kürzer als die aus dem aktuellen Master-Tourenplan hergeleiteten Auslieferungstouren.

		14.08.	15.08.	16.08.	17.08.	18.08.	19.08.	20.08.	Durchschnitt pro Tag
Tourenplan 0	Tour 0.1	53.298	55.222	57.634	55.222	57.734	49.802	50.828	54.249
	Tour 0.2	44.590	44.590	43.790	43.790	44.590	40.366	39.566	43.040
	gesamt	97.888	99.812	101.424	99.012	102.324	90.168	90.394	97.289
Tourenplan 1	Tour 1.1	47.033	47.381	46.617	46.581	47.258	40.836	40.442	45.164
	Tour 1.2	35.293	38.025	39.328	38.353	39.328	31.586	33.006	36.417
	gesamt	82.326	85.406	85.945	84.934	86.586	72.422	73.448	81.581

Tab. 5: Länge [m] der aus dem aktuellen und dem neu berechneten Master-Tourenplan 1 abgeleiteten Auslieferungstouren

5 Ausblick

Es wird deutlich, dass in dem vorliegenden Fall der Tourenplanung für den Menübringdienst des DRK Magdeburg durchaus noch Rationalisierungspotentiale vorhanden sind. Bei einer sich häufig ändernden Ausgangssituation (Kundenstamm) sind diese nur durch den Einsatz einer geeigneten Planungs-Software erschließbar. Damit müssen die zu erwartenden Einsparungen (Ausgaben für Benzin, Wartung und Reparaturen, Personal usw.) gegen die Ausgaben für den Erwerb (oder die Miete) und die Implementierung einer solchen Software sowie die Schulung der Mitarbeiter abgewogen werden. Tatsächlich müssen diese Ausgaben nicht sehr hoch sein, einfache – für die betrachtete Problemstellung ausreichende – Pakete zur Tourenplanung werden schon für ca. 3000 € angeboten. Weniger professionell gestaltete Software ist im WWW auch frei verfügbar (z.B. Jopt.NET-Vehicle Routing Software L 1.0.9).

Literatur

ADAC e.V (2005):

Autokosten 2005. CD-Rom, Programmversion 1.1 (Oktober 2005), Haar: NEW LOOK electronic publishing GmbH.

Domschke, W.; Drexl, A. (2005):

Einführung in Operations Research. 6. Aufl., Berlin et al.: Springer.

Fisher, M.L.; Jaikumar, R. (1981):

A Generalized Assignment Heuristic for Vehicle Routing. Networks 11, 109-124.

Grünert, T.; Irnich, S. (2005):

Optimierung im Transport – Band II: Wege und Touren. Aachen: Shaker Verlag.

Reinelt, G. (1994):

The Traveling Salesman - Computational Solutions for TSP Applications. Berlin et al.: Springer.

Toth, P.; Vigo, D. (2002):

The Vehicle Routing Problem (SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications). Philadelphia: SIAM.

Anhang

Standort-Nr.	Standort
0	Kroatenwuhne (Depot)
1	Flechtlinger Str.
2	Walbecker Str.
3	Seehäuser Str.
4	Beimsstr.
5	Beimsstr.
6	W.-Klees-Str.
7	Sudermannstr.
8	Sudermannstr.
9	Sudermannstr.
10	Friesenstr.
11	Fritz-Reuter-Str.
12	Stormstr.
13	Röntgenstr.
14	Zschokkestr.
15	Schweriner Str.
16	Semmelweisstr.
17	Leipziger Str.
18	Alt Fermersleben
19	Eickendorfer Str.
20	Eggersdorfer Str.
21	Am Unterhorstweg
22	Hosse-Privatweg
23	Saarbrücker Str.
24	Hohestieg
25	Blumenberger Str.
26	Alt Salbke
27	Alt Salbke
28	Husumer Str.
29	In der Mittelwiese
30	Sohlener Hauptstraße
31	Holsteiner Str.
32	Kieler Str.
33	Alt Westerhüsen
34	Gothaer Str.

Standort-Nr.	Standort
35	Blumenberger Str.
36	Eschenweg
37	Bertolt-Brecht-Str.
38	Paracelsusstr.
39	W.-Seelenbinder-Str.
40	Hermann-Hesse-Str.
41	Hermann-Hesse-Str.
42	Sudenburger Wuhne
43	Felsenbergstr.
44	Schroteanger
45	Gersdorfer Str.
46	B.-Beye-Ring (2 Kunden)
47	Bruno-Taut-Ring
48	Hans-Grade-Str.
49	Hans-Grade-Str.
50	St.-Josef-Str.
51	St.-Josef-Str.
52	Gerstengrund
53	Weizengrund
54	Weizengrund
55	Othrichstr.
56	Rollestr.
57	Meseberger Weg
58	Johannes-R.-Becher-Str.
59	Johannes-R.-Becher-Str.
60	Am Seeufer
61	Bebertaler Str.
62	Ankerstr.
63	Schmidtstr.
64	Pettenkofer Str.
65	Agnetenstr.
66	Moldenstr.
67	Breiter Weg
68	Otto-Richter-Str.

Tab A-1: Kunden und deren Standorte*

* Aus Datenschutzgründen werden hier die jeweiligen Hausnummern nicht angegeben.

Standort-Nr.	Fußweg w_j [sec]			Zugang z_j [sec]			Servicezeit s_j [sec]
	kurz	mittel	lang	leicht	mittel	schwer	
	20	38	62	9	36	73	
1	x			x			75
2		x		x			111
3		x			x		165
4		x		x			111
5	x				x		129
6		x			x		165
7	x					x	203
8	x				x		129
9	x					x	203
10			x		x		213
11		x		x			111
12	x			x			75
13		x			x		165
14	x				x		129
15	x				x		129
16		x			x		165
17			x		x		213
18		x			x		165
19		x		x			111
20		x		x			111
21	x				x		129
22		x		x			111
23		x		x			111
24		x		x			111
25		x			x		165
26	x			x			75
27	x			x			75
28	x			x			178
29	x			x			75
30	x			x			75
31	x			x			75
32	x			x			75
33	x			x			75
34	x			x			75

Tab. A-2: Servicezeiten der Kundenstandorte

Standort-Nr.	Fußweg w_j [sec]			Zugang z_j [sec]			Servicezeit s_j [sec]
	kurz	mittel	lang	leicht	mittel	schwer	
	20	38	62	9	36	73	
35	x			x			75
36	x			x			75
37		x		x			111
38	x			x			75
39		x			x		165
40		x				x	239
41		x				x	239
42		x			x		165
43		x		x			111
44		x		x			111
45	x			x			75
46		x			(x)	x	256
47	x				x		129
48			x		x		316
49			x		x		213
50		x				x	239
51		x				x	239
52		x			x		165
53			x	x			159
54		x		x			111
55			x	x			159
56		x		x			111
57		x		x			111
58		x		x			111
59		x			x		165
60		x				x	239
61		x				x	239
62		x				x	239
63		x			x		165
64		x		x			111
65		x				x	239
66			x	x			159
67		x				x	239
68	x				x		129

Tab. A-2: Servicezeiten der Kundenstandorte (Forts.)

Working Paper 2007

Nr. 1 / 2007

Kirstein, Roland und Robert D. Cooter.

Sharing and Anti-Sharing in Teams

Nr. 2 / 2007

Simons, Harald.

Transfers, non-tradable goods and a distorted economy in eastern Germany.

Nr. 3 / 2007

Felder, Stefan.

The variance of the length of stay and the optimal DRG outlier payments.

Nr. 4 / 2007

Kirstein, Roland und Annette Kirstein.

Inefficient Intra-Firm Incentives Can Stabilize Cartels in Cournot Oligopolies.

Nr. 5 / 2007

Brosig, Jeannette, Thomas Riechmann und Joachim Weimann.

Selfish in the end? An investigation of consistency and stability of individual behavior.

Nr. 6 / 2007

Schöndube-Pirchegger, Barbara.

Corporate Governance, Reputation Concerns, and Herd Behavior.

Nr. 7 / 2007

Block, Jörn Hendrich, Thorsten Staak und Philipp Tilleßen.

Ist das staatliche Eingreifen ins Gründungsgeschehen theoretisch legitimiert?

Nr. 8 / 2007

Haußner, Heike, Jessica Knauel und Gerhard Wäscher.

Tourenplanung für den Menübringdienst des Deutschen Roten Kreuzes Magdeburg
- Eine Fallstudie.

Nr. 9 / 2007

Groh, Gangolf.

Involuntary Unemployment in a Competitive Labour Market.