

Intelligente Optimierungsverfahren für Standort- und Transportprobleme im Gesundheitswesen

Zusammenfassung

Dieser Artikel beschreibt Fahrzeug-Standortplanungsprobleme und Tourenplanungsprobleme im Bereich des Gesundheitswesens. Insbesondere werden die Aufstellung von Rettungsfahrzeugen, das Patiententransportproblem und der Transport von Medikamenten und notwendigen Materialien im Gesundheitswesen behandelt. Dabei werden die Probleme erklärt und die mathematischen Modelle angegeben, wobei die österreichische Situation besonders berücksichtigt wird. Weiters werden die wichtigen Aspekte bei der Verwendung von Geographischen Informationssystemen für derartige Logistikprobleme besprochen. Ergänzend werden in den einzelnen Kapiteln jeweils relevante und verwandte Arbeiten zitiert.

Abstract

This paper discusses vehicle location and transportation problems arising in the field of health care logistics. Especially ambulance location, patient transportation and health care material transportation problems are presented. The underlying basic models are vehicle routing, dial-a-ride, and coverage location models. The problems are introduced; the models are presented and discussed in the context of their applications with a focus on the Austrian situation. Also the important aspects by using a geographic information system for planning logistics problems are mentioned. Moreover an overview of the most important related work in this field is given.

AUTOREN

Karl F. Doerner, Günter Kiechle

1. Einleitung

In den letzten Jahren entwickelte sich das Gesundheitswesen zu einem der wichtigsten Wirtschaftszweige in den Industriestaaten. Dieser Trend wird weiter andauern, da die Gesellschaft immer älter und die medizinischen Behandlungsmethoden kontinuierlich verbessert werden. Dadurch steigt der Druck, die Effizienz medizinischer Behandlungen und Dienstleistungen zu steigern. Die Entwicklung ausgereifter und innovativer Entscheidungsunterstützungssysteme ist dabei unerlässlich. Die medizinische Behandlung erfolgt vor allem in Krankenhäusern, in medizinischen Einrichtungen und bei niedergelassenen Ärzten. Um die zu behandelnden Personen, die Patienten, in das Krankenhaus bzw. zu den Behandlungsstationen zu bringen sind (transport-)logistische Dienstleistungen notwendig.

Logistische Dienste sind zudem für die Versorgung der Behandlungsstationen mit medizinischen Materialien und Medikamenten erforderlich.

Durch die Verfügbarkeit von Geographischen Informationssystemen (GIS) auf herkömmlichen PCs wird es möglich, die Planung der Logistik effizienter und vor allem effektiver zu gestalten. Die Verfügbarkeit von genauen Strassen- und Distanzinformationen, Durchfahrtszeiten, Erreichbarkeiten - im speziellen die Berechenbarkeit von Reisezeiten von bestimmten Ausgangsorten zu bestimmten Zielorten - macht es möglich, präzise und akkurate Routen- und Tourenpläne in Logistik-Entscheidungsunterstützungssystemen zu erstellen. Bei Logistikanwendungen im Gesundheitsbereich sind besondere Präzisionsanforderungen gegeben, weil die Genauigkeit der Planung wie z. B. die Übereinstimmung der errechneten Hilfsfrist bei der Notfallversorgung mit der tatsächlichen Hilfsfrist über die Rettung von Menschenleben entscheidet.

Die zugrunde liegenden Standort- und Tourenplanungsprobleme im Gesundheitswesen sind bereits in der einfachsten Form als schwere Probleme bekannt – Probleme realer Größe können nicht exakt gelöst werden, d. h. die optimale Lösung kann nicht in vernünftiger Zeit ausgerechnet werden. Daher ist es notwendig, auf die Entwicklung heuristischer Suchverfahren zurückzugreifen. Bei der Entwicklung von derartigen Suchverfahren werden sehr häufig Anleihen aus der Natur genommen, z.B. von Bienen, Ameisen oder der genetischen Evolution.

Derzeit gibt es einige unterschiedlich erfolgreiche Konzepte für derartige Suchverfahren. Ein Konzept dieser Suchverfahren lässt sich auch dem Laien anschaulich erklären: die Optimierung mit künstlichen Ameisen (siehe Stützle und Dorigo, 2004). Bei Ameisen konnte beobachtet werden, dass sie auf ihren Erkundungen Duftspuren hinterlassen. Nach einem anfänglich zufälligen Herumsuchen finden Ameisen ein Objekt, das sie interessiert – etwa Futter – und bringen dieses zurück zu ihrer Wohnstätte. Je öfter die kürzeren Pfade begangen werden, desto stärker werden die Duftspuren auf diesen Pfaden – und ziehen damit das Interesse von anderen Ameisen auf sich. Auf diese Weise bildet sich nach einiger Zeit ein optimaler Weg heraus. Diese Metapher ist nur eine der Ideen, die sehr oft in heuristischen Suchverfahren zur Lösungsfindung verwendet werden.

Transport- und Standortprobleme lassen sich sehr häufig nur durch den Einsatz von heuristischen Suchverfahren sinnvoll lösen. Eine sehr große - möglicherweise die größte - Herausforderung im Logistikbereich hinsichtlich Komplexität, Dynamik und katastrophaler Auswirkungen (wenn falsche Berechnungen durchgeführt werden), sind Anwendungen der Logistik im Gesundheitswesen. Das Institut für Betriebswirtschaftslehre der Universität Wien und Salzburg Research beschäftigen sich seit Jahren mit Logistikanwendungen im Gesundheitsbereich. Im ▶

nachfolgenden sollen zwei spezielle Aufgabenstellungen verwendet werden, um Entscheidungssituationen und Lösungskonzepte darzustellen.

1.) Notfallschutz und Patiententransport: Dabei geht es in erster Linie um Patienten zu den Behandlungsstationen zu transportieren.

2.) Transport von medizinischen Gütern: Das betrifft die Versorgung der Gesundheitseinrichtung mit Gütern und Medikamenten, insbesondere verderbliche Güter wie beispielsweise Blut stellen eine besondere Herausforderung dar.

Nachfolgend werden für Punkt 1.) und für Punkt 2.) jeweils ein mathematisches Modell angegeben. Die erzielten Ergebnisse werden in aggregierten Werten angegeben und besprochen. Darüber hinaus werden die relevanten Modelle und Lösungsansätze der internationalen Literatur neben den eigenen Arbeiten zitiert. Eine umfassende Zusammenstellung der relevanten mathematischen Modelle der Standort- und Transportprobleme im Gesundheitswesen kann in Doerner und Hartl, (2007) nachgelesen werden.

Ein wichtiges Element für die Touren- und Standortplanung ist die Berechnung der kürzesten Wege auf realen Strassennetzen. Ein weiterer wichtiger Aspekt für eine realistische Planung ist die Erhebung der tatsächlichen Reisezeiten auf dem realen Strassennetzgraph. Auf diesen beiden Aspekten wird am Ende des Beitrages eingegangen.

2. Notfallschutz und Patiententransport

Bei der Planung einer effizienten Patientenversorgung sind zwei unterschiedliche Entscheidungssituationen zu betrachten.

1.) Die taktische Entscheidungssituation umfasst die Verteilung der Fahrzeuge auf die potentiellen Standorte, sodass die Hilfsfrist eingehalten werden kann bzw. möglichst gering ist.

2.) Die operative Entscheidungssituation umfasst die Einplanung der geplanten Patiententransporte in der Art und Weise, sodass die durchschnittliche Reisezeit der Patienten möglichst gering ist und dabei auch die Kosten des Transportes gering bleiben.

Die taktischen Standortentscheidungen benötigen in gleichem Ausmaß wie die klassischen Transportprobleme Dis-

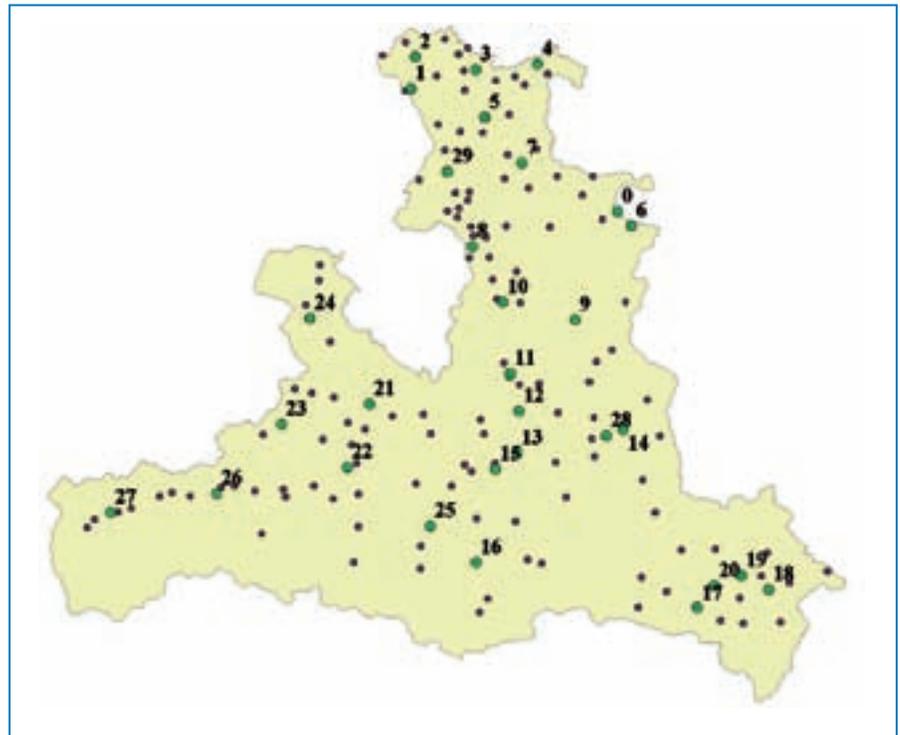


Abb 1: Potentielle Rettungsstandorte in Land Salzburg. Quelle: Doerner et al. (2005)

tanzinformationen von den potentiellen Standorten zu allen potentiellen Patientenwohnorten. Speziell die Hilfsfrist, d. h. die Antwortzeit bis eine angeforderte Rettung bzw. ein Notarztwagen bei einem Patienten eintrifft, ist bei der Positionierung und Umpositionierung von Rettungsfahrzeugen besonders zu berücksichtigen. In Österreich werden Notfalleinsätze und geplante Patiententransporte mit derselben Fahrzeugflotte durchgeführt. D. h. leere Krankenwagen, die einen Patient in einem Krankenhaus abgeliefert haben, werden bei der Einplanung von Notfalleinsätzen mitberücksichtigt und gegebenenfalls für den Notfall disponiert. Dadurch ergibt sich eine sehr komplexe Problemstellung, die drei unterschiedliche Ziele verfolgt. Ein Ziel betrifft die Notfalleinsätze, es geht um Minimierung der Hilfsfrist, zwei weitere Ziele resultieren aus der Planung des geplanten Patiententransportes, die Minimierung der durchschnittlichen Reisezeit des Patienten und die Minimierung der Transportkosten.

2.1 Standortentscheidung

Bevor man sich dem operativen Problem zuwenden kann, d. h. den täglichen Patiententransport zu planen, ist es notwendig, das taktische Problem zu betrachten und eine Positionierung der Rettungsfahr-

zeuge vorzunehmen. Ausgehend von dieser Positionierung sollte die Einhaltung der Hilfsfrist für Notfälle gewährleistet sein, und die Durchführung des Routine-transportes sinnvoll und effizient abgewickelt werden können. Die Ausgangssituation für die Aufstellung der Fahrzeuge umfasst meistens eine Reihe von bereits errichteten Dienststellen bzw. eine Auswahl an Standorten, wo es möglich ist, Dienststellen einzurichten. Darüber hinaus gibt es gesetzliche Regelungen bezüglich einzuhaltender Hilfsfristen. Ausgehend von diesen Rahmenbedingungen ist es unter Verwendung moderner Optimierungsverfahren möglich, die minimal benötigte Fahrzeuganzahl auszurechnen. In Österreich ist es in der Regel machbar, die notwendige Anzahl an Fahrzeugen zu platzieren, damit die gesetzlich vorgeschriebene Hilfsfrist eingehalten werden kann. Ein leicht abgeändertes Problem muss gelöst werden, wenn das verfügbare Budget es nicht zulässt, eine beliebige Anzahl an Fahrzeugen zu kaufen und zu platzieren. In diesem Fall ist es sinnvoll, die verfügbaren Fahrzeuge so aufzustellen, dass eine möglichst geringe Hilfsfrist erreicht wird. Benötigte Eingabedaten für diese Optimierungsaufgabe sind Erreichbarkeitsmatrizen; d. h. es wird in einer Tabelle für jeden potentiellen Rettungs-

standort vermerkt, welche Patientenstandorte man von diesem Standort aus erreichen kann. Dabei wird nicht jeder Haushalt separat berücksichtigt; die Berechnung in städtischen Gebieten wird auf Ebene von Mikrorasterdaten durchgeführt (siehe Abb. 2) und in ländlichen Gebieten, wo die geographischen Daten bezüglich Einwohnersituation nicht so detailliert vorliegen, wird die Planung auf Basis der Ortsgebiete durchgeführt (siehe Abb. 1). In Abb. 1 repräsentieren, die mit Zahlen gekennzeichneten Knoten, die potentiellen Standorte für Krankenwägen. Die nicht gekennzeichneten Knoten repräsentieren die Einwohnerpunkte. Zusätzlich zu den Erreichbarkeitsinformationen von jedem Nachfragepunkt sind noch die aggregierten Einwohnerzahlen für jeden Nachfragepunkt notwendig.

Die Einwohnerzahlen bzw. die Anzahl der Menschen, die sich in einem Nachfragepunkt aufhalten, sind nicht konstant und unterliegen Änderungen. Daher ist es sinnvoll und durchaus auch notwendig, für verschiedene Tageszeiten (Tag bzw. Nacht, Wochentag und Wochenende) die Aufstellung der Rettungsfahrzeuge zu verändern und anzupassen. Idealerweise sollten saisonale Veränderungen auch in die Planung miteinbezogen werden, Skigebiete benötigen mehr Rettungsdienstfahrzeuge in den Wintermonaten, wo-

hingegen in den Sommermonaten an den Badeseen verstärkt Rettungsfahrzeuge aufgestellt werden sollten. Allerdings ist bei der Erstellung der unterschiedlichen Aufstellungspläne darauf zu achten, dass nicht allzu viele (unnötige) Umplatzierungen notwendig werden, um von einem Aufstellungsplan zu einem anderen zu kommen. In Nordamerika werden bereits Aufstellungsstrategien überlegt und erprobt, bei denen es zu laufenden Umplatzierung der Fahrzeuge kommt, um sicherzustellen, dass die geforderte Hilfsfrist flächendeckend eingehalten wird (siehe Gendreau et al., 2006). Die (optimale) Aufstellung der Fahrzeuge für Österreich (unter einigen vereinfachenden Annahmen) sind in Doerner et al. (2005) für den ländlichen Raum und in Dorner (2006) für den städtischen Raum Wien ermittelt worden. Brotcorne et al. (2003) geben einen umfassenden Überblick über die verschiedenen Standortplanungsmodelle für Fahrzeuge. Gendreau et al. (2007) behandeln bereits eine dynamische Reallokation der Fahrzeuge, sobald eine gewisse Abdeckung unterschritten wird. Ein derartiges Modell ist aufgrund der österreichischen Rechtslage derzeit noch nicht einsetzbar – im Moment ist es nicht möglich, dass Fahrzeuge systematisch leer herumfahren, nur damit eine hohe Abdeckung erzielt wird. Eines der einfachsten Stand-

ortplanungs-Modelle für Fahrzeuge wird nachfolgend dargestellt.

Die notwendigen Eingabedaten sind die Einwohnerzahlen d_i für jeden Nachfragepunkt i . Weiters muss die Anzahl der aufzustellenden Rettungsfahrzeuge p bekannt sein. Zusätzlich muss noch die Relation gegeben sein ob ein Rettungsfahrzeug auf dem Standort j auch den Standort i in der vorgegebenen Hilfsfrist erreichen kann. D. h. es gibt eine Matrix mit eingetragenen Werten 1, wenn von Standort j Standort i innerhalb der Hilfsfrist erreicht wird.

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{wenn Standort } j \text{ von Standort } i \\ & \text{erreicht wird} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Die nachfolgenden Entscheidungen – modelliert über binäre Entscheidungsvariablen – sind zu treffen.

$$z_i = \begin{cases} 1 & \text{wenn Standort } i \text{ von einem aufgestellten} \\ & \text{Fahrzeug erreicht wird} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{wenn ein Fahrzeug auf Standort } j \\ & \text{aufgestellt ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Das Ziel ist es, möglichst viele Einwohner mit den verfügbaren Fahrzeugen innerhalb der Hilfsfrist zu erreichen. Daraus resultiert die folgende Zielfunktion

$$\max z(p) = \sum_i d_i z_i$$

d.h. es soll die Summe der erreichten Einwohner d_i maximiert werden. D. h. möglichst viele z_i sollen auf 1 gesetzt werden (insbesondere die z_i die eine sehr hohe Einwohnerzahl haben).

Die nachfolgenden Nebenbedingungen müssen dabei eingehalten werden.

$$\sum_i y_i = p$$

d. h. es dürfen maximal p Standorte auf 1 gesetzt werden. Es ist nicht möglich, mehr Fahrzeuge als die verfügbare Fahrzeuganzahl p auf die verschiedenen Standorte aufzustellen.

$$z_i \leq \sum_j a_{ij} y_j \quad \forall i$$

d.h. Standorte gelten nur als erreichbar ($z_i=1$), wenn sie auch von einem Fahrzeug das auf Standort j platziert ist ($y_j=1$) erreicht werden.

Alle Entscheidungsvariablen sind ►

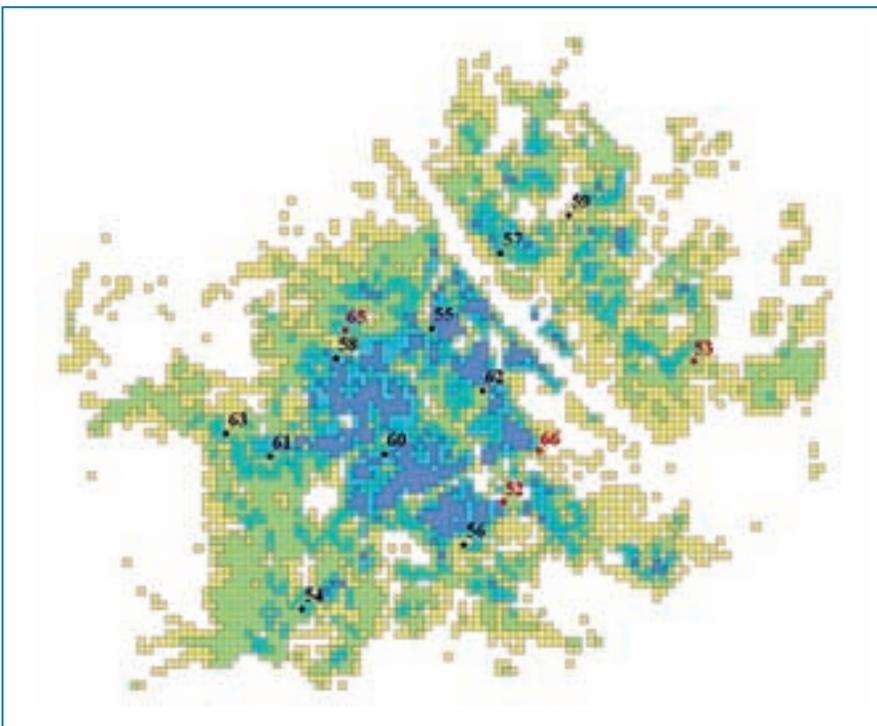


Abb. 2: Potentielle Rettungsstandorte in der Stadt Wien. Quelle: Dorner (2006).

binär, d.h. sie können entweder den Wert 0 oder den Wert 1 annehmen.

$$z_i \in \{0,1\}$$

$$y_j \in \{0,1\}$$

Für den städtischen Raum wurde auch ausgerechnet, welche Aufstellplätze des Rettungsdienstes nicht unbesetzt sein dürfen – d. h. wo die Hilfsfrist am stärksten verschlechtert wird, wenn diese Stellplätze unbesetzt sind (siehe Abb. 2). Die kritischen Standorte sind die Standorte 52, 53, 55, 56, d. h. wenn einer dieser Standorte nicht besetzt ist, weil das dort aufgestellte Fahrzeug einen Einsatz absolviert, dann reduziert sich die Abdeckung am stärksten, daher ist immer darauf zu achten, dass diese Standorte nicht sehr häufig unbesetzt bleiben. Allgemein kann festgehalten werden, dass durch eine verbesserte Aufstellung der Rettungsfahrzeuge die Abdeckung noch um einige Prozentpunkte verbessert werden könnte, obwohl mit der derzeitigen Aufstellung der Rettungsfahrzeuge die gesetzlich geforderte Hilfsfrist grundsätzlich eingehalten wird.

2.2 Planung des Standardpatiententransportes

Nachdem das taktische Problem gelöst ist, d. h. die Fahrzeuge sind auf die diversen Standorte aufgeteilt, muss das operative tägliche Zuteilen der Aufträge zu den Fahrzeugen erfolgen. Die im Voraus geplanten Patiententransporte sind sinnvoll einzuplanen, und die Durchführung der Notfalltransporte ist effizient zu gestalten.

Die geplanten Patiententransporte werden auf die Fahrzeuge zugeteilt, so dass die Patienten nicht unnötig lange am Fahrzeug verweilen müssen, wobei auch auf die Minimierung der Transportkosten geachtet wird. Dieses Problem wurde neben Parragh et al. (2007) bereits von Madsen et al. (2005), Toth und Vigo (1997), Melachrinoudis et al. (2007). In Beaudry et al. (2006) wurde ein dem österreichischen Patiententransport sehr nahe kommendes Modell betrachtet. In den Übersichtsartikeln von Cordeau und Laporte (2003, 2007) werden umfassend die verschiedenen Varianten des Dial-a-Ride Problems behandelt. Das Dial-a-Ride ist das theoretische Problem, das dem Patiententransport am ehesten entspricht. Dazu kommt in Österreich die zusätzliche Herausforderung der Planung des Notfall-

patiententransportes. Dieser wird mit der gleichen Flotte wie der reguläre Patiententransport abgewickelt. Bei Auftreten eines Notfalls wird vom GIS basierten Entscheidungsunterstützungssystem immer das nächste freie Rettungsfahrzeug vorgeschlagen und für den Notfall disponiert. D. h. wenn ein Notfall auftritt, ist somit auch eine Umplanung des regulären Patiententransportes notwendig, da die Aufträge, die diesem Fahrzeug in der nahen Zukunft zugeteilt wurden, von einem anderen Fahrzeug übernommen werden müssen.

Um für beide Probleme eine gute Lösung zu bekommen, sind verschiedene Schritte bereits in der Planung notwendig.

1.) Zuerst gilt es, einen sehr schnellen Optimierungsalgorithmus zu entwickeln, der sehr rasch im Falle eines Notfalles das Fahrzeug auswählt, welches den Notfalltransport durchführen soll.

2.) Notwendig ist ebenfalls ein schneller und effizienter Algorithmus, der auf Basis der geänderten Situation einen neuen zulässigen Plan erstellt. D. h. das soeben vom regulären Transportplan abgezogene

Fahrzeug, das den Notfalltransport durchführt, muss durch die verbleibenden Fahrzeuge ersetzt werden. Genauer gesagt, die Aufträge, die für dieses Fahrzeug vorgesehen waren, werden von den verbleibenden Fahrzeugen übernommen, solange das geplante Fahrzeug durch die Durchführung des Notfalltransportes blockiert ist.

Die wesentliche Herausforderung bei der Erstellung eines Transportplanes ist die Berücksichtigung des weiteren Zielkriteriums - die Hilfsfrist für die Notfalltransporte. Bereits in der Planung der regulären Patiententransporte sollte die Einhaltung bzw. Verbesserung der Hilfsfrist stets mitberücksichtigt werden. D. h. der reguläre Patiententransport sollte nach Möglichkeit so geplant werden, dass zu jeder Tageszeit die Rettungsfahrzeuge sehr gut über das Planungsgebiet verteilt sind. Erste Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass durch eine Einbeziehung der Hilfsfrist in die Planung der Standardpatiententransporte, das Eintreffen des Rettungsfahrzeuges im Notfall im Mittel um einige Minuten reduziert werden kann, wobei sich die Kosten für die regulären Patiententransporte nur geringfügig er-

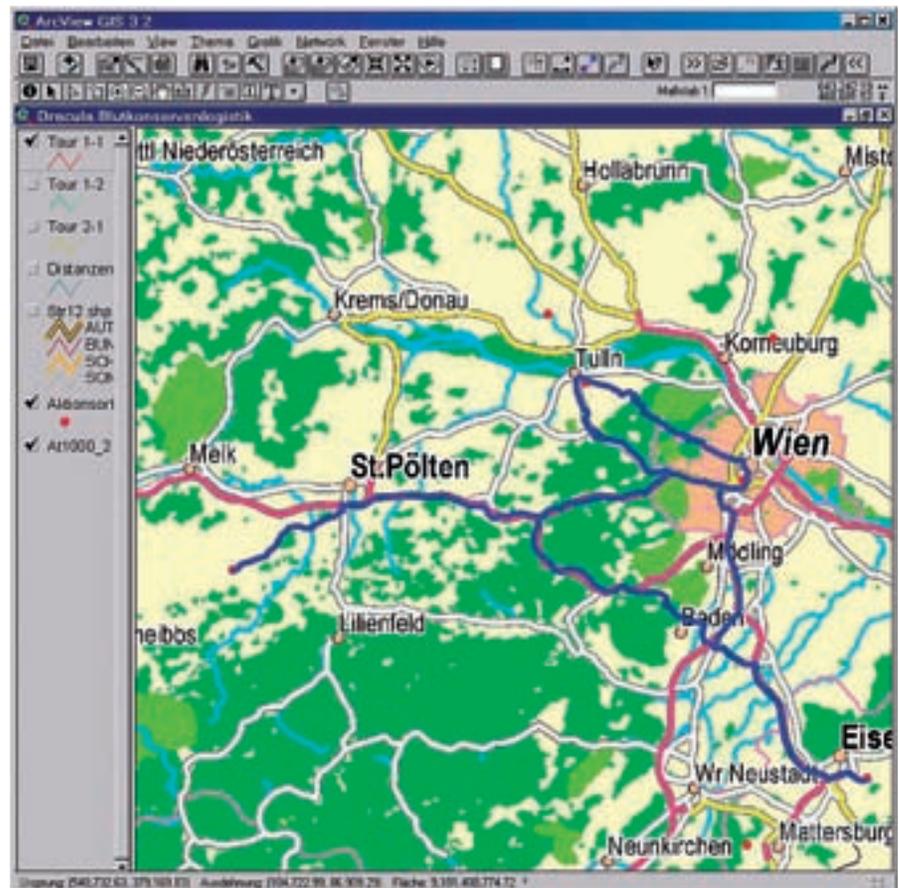


Abb. 3: Screen Shot der Software aus dem Projekt DRACULA für die Blutspendentransportlogistik.

höhen. Das System für die gemeinsame Planung von regulärem Patiententransport und Notfalltransport wird derzeit im Rahmen eines Forschungsprojektes gemeinsam mit dem Österreichischen Roten Kreuz und der Universität Wien entwickelt und erprobt (siehe Kiechle et al., 2007).

3. Transport von Medikamenten und verderblichen Gütern

Die Planung der effizienten Versorgung der Krankenhäuser mit Medikamenten und Verbrauchsmaterialien ist ein schwieriges Optimierungsproblem mit gänzlich anderen Charakteristika als der Personentransport. Insbesondere der Transport von verderblichen Gütern wie z. B. Blut und Blutprodukten ist eine besondere Herausforderung. Hier geht es vor allem darum, dass der Bedarf an Blutprodukten in den Krankenhäusern jederzeit und in der gewünschten Qualität vorrätig ist.

Der Transport von Blut umfasst im Wesentlichen zwei unterschiedliche Transportprobleme:

- 1.) Blutspenden einsammeln; der Transport von gespendeten Blut zur weiteren Verarbeitung in die Blutbank
- 2.) Blutprodukte ausliefern; der Transport der fertig verarbeiteten Blutprodukte von der Blutbank zu den diversen Krankenanstalten.

In Griffin et al. (2007) wird neben dem Problem der Blutprodukte Auslieferung auch ausführlich auf andere logistische Probleme im Gesundheitswesen eingegangen.

3.1 Blutspenden einsammeln

Der österreichische Blutbedarf wird zum überwiegenden Teil durch freiwillige Blutspenden aufgebracht. Der freiwillige Spender wird eingeladen, sein Blut bei mobilen Blutspendeaktionen zu spenden. Für die Produktion spezieller Blutprodukte müssen Blutspenden innerhalb von vier Stunden ab dem Zeitpunkt der Abnahme in der Blutbank zur Weiterverarbeitung eingetroffen sein. Aus dieser zeitlichen Einschränkung ergibt sich ein erheblicher logistischer Aufwand, um die Blutspenden zeitgerecht von den Aktionsorten abzutransportieren, damit sie fristgerecht in die Blutbank gelangen. Für die Dauer einer Blutspendeaktion müssen die anfallenden Blutspenden in regelmäßigen Abständen abgeholt und in die Blutbank

transportiert werden. Eine wesentliche Zielsetzung bei diesem Problem ist die kostenminimale Transportplanung, wobei sichergestellt werden muss, dass keine Blutspende verdirbt, d.h. zu spät in die Blutbank geliefert wird.

Ein wesentliches Charakteristikum des vorliegenden Optimierungsproblems ist die Tatsache, dass eine Abholung der Spenden an einem Aktionsort den spätesten Zeitpunkt der darauf folgenden Abholung an diesem Ort bestimmt. Während einer Blutspendeaktion werden laufend und somit auch direkt nach einer Abholung Spenden abgenommen. Damit Blut nicht verdirbt, darf deshalb die Summe der Zeit zwischen zwei Abholungen und der Zeit, die für den Transport in die Blutbank benötigt wird, nicht größer als vier Stunden sein. Einsparungspotential im Vergleich zur manuellen Planung der Transporte ergibt sich vor allem aufgrund der Möglichkeit, mehrere Abholungen auf einer Tour zu verknüpfen.

Mit unseren entwickelten Lösungsverfahren lassen sich Einsparungen von 10 % der gesamten Reisezeiten erreichen (siehe Doerner et al., 2007). In Abb. 3 ist eine exemplarische Route in dem Softwareprototypen DRACULA dargestellt (siehe Kiechle und Doerner, 2007).

3.2 Blutprodukte ausliefern

Krankenhäuser benötigen eine Reihe von Produkten, um ihre Patienten zu behandeln und ordnungsgemäß zu versorgen. Viele Produkte, insbesondere Produkte, die aus frischem Spenderblut hergestellt werden, haben eine kurze Lebensdauer. Daher muss die Auslieferung und die Lagerbestandsverwaltung in den Spitälern sorgfältig geplant und durchgeführt werden. Blutprodukte sind für die Krankenhäuser außerordentlich wichtig, da sie sehr häufig für Operationen und für die Behandlung von Patienten mit chronischen Erkrankungen wie z. B. Krebspatienten benötigt werden. Blutprodukte werden regelmäßig an immer die gleichen Krankenhäuser ausgeliefert, dabei ist besonders darauf zu achten, dass einerseits kein Blutprodukt verdirbt und es andererseits nicht vorkommt, dass Blut der benötigten Blutgruppe ausgeht.

Wenn man regelmäßig die gleichen Kunden beliefert, dann bieten sich neben den Einsparungsmöglichkeiten durch eine verbesserte Tourenplanung noch weitere

Einsparungsmöglichkeiten an, die sich durch verbessertes Lagerbestandsmanagement ergeben. In Hemmelmayr et al. (2007) werden Einsparungsmöglichkeiten untersucht, die sich durch ein verkäuferorganisiertes Lagerbestandsmanagement ergeben. In der aktuellen Situation bestellt jedes Krankenhaus, wann es Bedarf an Blutprodukten hat. D. h. der Blutlieferant muss die Lieferung durchführen, sobald die Bestellung eintrifft.

Betrachten wir die folgende Situation: In Ostösterreich gibt es zwei Krankenhäuser, die relativ nahe nebeneinander liegen. Das sind die Krankenhäuser Kittsee und Hainburg, diese beiden Krankenhäuser bestellen unabhängig voneinander die notwendigen Blutprodukte. Daher kann es vorkommen, dass am Montag eine Bestellung von Krankenhaus Kittsee in der Blutbank eingeht, und am Dienstag der Auslieferungsdienst wieder in diese Region fahren muss, da es eine Bestellung vom Krankenhaus Hainburg gibt. Wenn der Lieferant jeden Tag die aktuellen Lagerbestände aller Krankenhäuser kennt, dann hätte er bereits am Montag gesehen, dass am Dienstag eine Bestellung vom Krankenhaus Hainburg aufgegeben wird. Sinnvollerweise hätte er dann die Lieferung für Hainburg bereits am Montag mitnehmen können. Eine mögliche Modellierung des Problems wird nachfolgend angegeben. Für Details siehe Hemmelmayr et al. (2007).

Es soll für n Krankenhäuser die Blutbelieferung für den Planungshorizont von T Tagen durchgeführt werden. Die Variable z_t ist eine binäre Variable die angibt, ob eine Belieferungsrouten am Tag t ausgeführt wird. Die Variable y_i^t ist eine binäre Variable, die angibt ob ein Krankenhaus i am Tag t besucht wird oder nicht. Die kontinuierliche Variable d_i^t gibt die Blutmenge an, die am Tag t in das Krankenhaus i geliefert wird. Die kontinuierliche Variable I_i^t gibt den Blutlagerbestand in Krankenhaus i am Beginn von Tag t an. Die binäre Entscheidungsvariable x_{ij}^t gibt an, ob das Blutauslieferungsfahrzeug von Krankenhaus i direkt zu Krankenhaus j am Tag t fährt (wobei die Indizes 0 und $n+1$ für das Blutdepot stehen). Die notwendigen Daten sind die Reisezeiten t_{ij} von Krankenhaus i nach Krankenhaus j , die Ablatedauer bei Krankenhaus i ist mit s_i gegeben. Der notwendige Blutbedarf in Krankenhaus i am Tag t ist gegeben durch u_i^t . Der Blut- ▶

lageranfangsbestand am ersten Tag in der Planungsperiode ist durch I_1^1 gegeben. Die Lagerkapazität bei den Krankenhäusern i ist mit C_i angegeben. Die maximale Tourlänge ist mit D angegeben. Die Sicherheitsbestandspolitik ist folgende, dass bei jedem Krankenhaus zumindest für k_1 Tage der Blutbedarf gedeckt werden kann. Weiters ist noch angegeben, dass das Blut in k_2 Tagen verdirbt. Der Blutlagerendbestand in den Krankenhäusern muss zumindest gleich dem Blutlageranfangsbestand sein. Wenn man annimmt, dass die Krankenhäuser immer im Rahmen von fixen Besuchsrouten angefahren werden und zwar in der Reihenfolge von 1 bis n dann sieht die Formulierung des Optimierungsproblems so aus:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} t_{ij} x_{ij}^t$$

unter den folgenden Nebenbedingungen:

$$I_i^{t+1} = I_i^t - u_i^t + d_i^t \quad \forall i=1, \dots, n, t=1, \dots, T$$

Diese Bedingungen sind die Lagerbestandsgleichungen, die das Lagerbestandsgleichgewicht von Periode t zu Periode $t+1$ sicherstellen.

$$I_i^t \geq \sum_{s=t}^{t+k_1-1} u_i^s \quad \forall i=1, \dots, n, t=1, \dots, T$$

Diese Nebenbedingungen stellen sicher, dass der Sicherheitsbestand in den Lagern der Krankenhäuser vorhanden ist. Weiters stellen nachfolgende Nebenbedingungen sicher, dass der Lagerbestand am Ende des Planungshorizontes zumindest die Menge umfasst, die am Beginn verfügbar war.

$$I_i^{T+1} \geq I_i^1 \quad \forall i=1, \dots, n$$

$$I_i^t \leq C_i \quad \forall i=1, \dots, n, t=1, \dots, T$$

Die obigen Nebenbedingungen stellen sicher, dass der Lagerbestand nicht die Lagerkapazität übersteigt. Die nachfolgenden Nebenbedingungen stellen sicher, dass nur soviel Blut eingelagert wird, dass es nicht verdirbt.

$$I_i^t \leq \sum_{s=t}^{t+k_2-1} u_i^s \quad \forall i=1, \dots, n, t=1, \dots, T$$

$$d_i^t \leq C_i y_i^t \quad \forall i=1, \dots, n, t=1, \dots, T$$

Mit den Nebenbedingungen wird sichergestellt, dass nur Blut abgeliefert werden kann, wenn das Krankenhaus auch besucht wird.

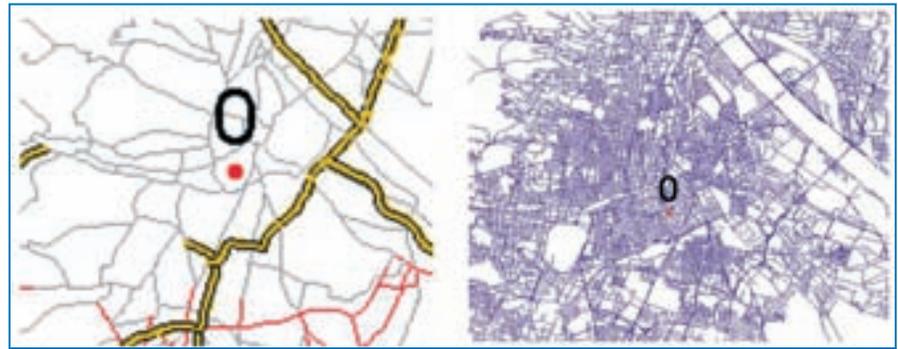


Abb. 4: Straßenkarten mit unterschiedlicher Qualität Quellen: ArcData, Statistik Österreich, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Teleatlas (Austria) GmbH

$$z_i \leq y_i^t \quad \forall i=1, \dots, n, t=1, \dots, T$$

Mit den obigen Nebenbedingungen wird nur angezeigt, an welchem Tag eine Route ausgeführt wird. Die nachfolgenden Nebenbedingungen modelliert, dass Krankenhäuser nicht besucht werden müssen, wenn sie keine Belieferung erhalten.

$$x_{ij}^t \leq y_i^t + y_j^t - I - \sum_{k=i+1}^{j-1} y_k^t \quad \forall i=0, \dots, n, j=1, \dots, n+1, t=1, \dots, T$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} t_{ij} x_{ij}^t + \sum_{i=1}^n y_i^t s_i \leq D \quad \forall t=1, \dots, T$$

Die obigen Nebenbedingungen stellen sicher, dass die maximale Tourlänge nicht verletzt wird. Die nachfolgenden Nebenbedingungen stellen sicher, dass das Depot in der Route enthalten ist. Das Depot ist an der Stelle 0 und $n+1$ codiert, damit die Tourlänge leichter ausgerechnet werden kann.

$$y_0^t = y_{n+1}^t = 1 \quad \forall t=1, \dots, T$$

Das beeindruckende Ergebnis dieser Studie zeigt, dass durch die Umstellung von einem käuferorganisiertem Lagerbestandsmanagement zu einem verkäuferorganisiertem Lagerbestandsmanagement Einsparungen der

Logistikkosten von bis zu 30 % möglich sind.

4. Kürzeste Wege

Um die entwickelten Tourenplanungsalgorithmen auf praktische Probleminstanzen anwenden zu können, müssen zuerst die notwendigen Daten aufbereitet und dem Programm übermittelt werden. Dazu ist es notwendig, die relevanten Daten, unter anderem die Koordinaten der Krankenhäuser, der (potentiellen) Patienten und der Blutspendeaktionen aus dem Informationssystem der Blutbank bzw. des Rettungsdienstes auszulesen.

Als Input für das Optimierungsmodul ist es notwendig, die Fahrzeiten zwischen allen geographischen Punkten zu berechnen und daraus eine Distanzmatrix zu erstellen. Dazu werden mit Hilfe eines GIS zuerst die Patientenstandorte bzw. die mobilen Blutspendeaktionen auf einer Landkarte geocodiert. Anschließend werden die kürzesten Wege zwischen allen Orten mit Hilfe der Daten aus dem digitalen Straßennetz berechnet. Für die Berechnung der Distanzmatrix sind effiziente Algorithmen verfügbar, die mittlerweile auch in den meisten GI-Systemen integriert sind.

Nachdem alle Eingabedaten für das Optimierungsmodul berechnet sind, kann das eigentliche Lösungsverfahren gestartet werden. Die Ergebnisse der Optimie-

Ergebnisse	Mittelwert	Anzahl	pos. Abw.	neg. Abw.	Std.-Abw.
Team	8,8	76	34	-30	10,4
Andere	0,6	91	24	-32	10,3
Gesamt	4,3	167			

Abb. 5: Vergleich realer und errechneter Fahrzeiten [min]

nung werden dann an das GIS zurückgegeben und dort als Touren in die digitale Landkarte eingezeichnet. Zusätzlich wird ein druckfähiger Fahrzeugeinsatzplan erzeugt, der auch am Bildschirm angesehen werden kann. Alle notwendigen Teile der Applikation werden in die GIS-Software integriert bzw. wird das GIS als Benutzerschnittstelle für alle Funktionalitäten verwendet. Für die Prototypen der Universität Wien und Salzburg Research wird ArcGIS von ESRI verwendet. Das GIS-Modul realisiert die Benutzerschnittstelle, die für alle Ein- und Ausgaben und auch für die Berechnung der Distanzmatrix zuständig ist. Bei Bedarf ruft das GIS-Modul die Funktionen des Optimierungs-Moduls auf, um Tourenplan und Fahrzeugeinsatzplan zu berechnen. Bei der Berechnung von dynamisch veränderlichen Problemen sind weitere Maßnahmen notwendig, um immer schnell die aktuellen Veränderungen zur Verfügung zu haben und die aktuelle Lösung graphisch anzuzeigen.

5. Tatsächliche Reisezeiten

Die praxisrelevante Optimierung von Problemen aus der Transportlogistik wird erst durch die Bestimmung von realistischen Durchfahrtszeiten ermöglicht. In wissenschaftlichen Untersuchungen wurden bisher oftmals euklidische Distanzen als Datenbasis verwendet. Die daraus errechneten Lösungen sind in praktischen Szenarien nur sehr begrenzt einsetzbar. Durch die Verwendung von GIS ist es vergleichsweise einfach, realistische Distanzinformationen für Punkt-zu-Punkt-Strecken zu berechnen. Dazu sind möglichst detaillierte digitale Straßenkarten nötig, die neben den Längeninformationen auch Daten zu Durchfahrtsgeschwindigkeit eines Straßenabschnittes zur Verfügung stellen. In Abb. 4 sind zwei Kartenausschnitte dargestellt, die in etwa denselben Ausschnitt von Wien zeigen. Allerdings umfasst das Straßennetz in der linken Karte nur Hauptstrassen und Autobahnen, während die rechte Karte eine komplette Darstellung aller Strassen des entsprechenden Gebietes enthält.

Beide Karten unterscheiden sich auch signifikant in den Kaufpreisen. Während die Kosten für eine Österreichkarte des linken Typs praktisch vernachlässigbar sind, kostet eine kommerziell verwendbare Karte des rechten Typs für ganz Österreich mehrere Zehntausend Euro.

Die vom Programm errechneten Dis-

tanzen zwischen Aktionsorten wurden im Rahmen des DRACULA Projektes (Rückholung von Blutspenden) mit tatsächlich beobachteten Fahrzeiten verglichen, um eine Bewertung ihrer Praxistauglichkeit vornehmen zu können. Dazu wurden insgesamt 167 Fahrten unterschiedlicher Fahrzeugtypen über die Aufzeichnungen der eingebauten Fahrtenschreiber ausgewertet. Als Fahrzeugtypen werden Teamfahrzeuge – in der Abbildung mit TEAM bezeichnet, die besonderen Geschwindigkeitsbeschränkungen unterliegen - und alle anderen Fahrzeuge unterschieden. In den Teamfahrzeugen wird die komplette Besatzung einer mobilen Abnahme transportiert, d. h. der Abnahmearzt und die Abnahmeschwester. Einen Überblick über die Ergebnisse der Auswertung zeigt Abb. 5.

Für alle ausgewerteten Fahrten wurde die mittlere Differenz zu den errechneten Fahrzeiten, die maximale positive und die maximale negative Abweichung aller betrachteten Fahrten zu den errechneten Fahrzeiten und die Standardabweichung aller Abweichungen berechnet. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die mittlere Abweichung für Teamfahrzeuge 8,8 Minuten und für alle anderen Fahrzeuge 0,6 Minuten beträgt. Die Einplanung zahlreicher Pufferzeiten bei der praktischen Durchführung von Bluttransporten und die vorhandenen zeitlichen Reserven bei der Verarbeitung in der Blutspendezentrale rechtfertigen die Vermutung, dass die Vorgaben der Tourenplanung bei besonderer Beachtung durch Fahrer und Produktionspersonal erfüllbar sind und keine Blutspenden zu spät verarbeitet werden.

6. Fazit und Zukunftsperspektiven

Die modulare Architektur unserer Pilot-systeme macht es möglich, dass das System mit wenig Aufwand für verwandte Tourenplanungsprobleme wieder verwendet werden kann. In dieser Hinsicht ist die Verbindung GIS und Tourenplanung ein vielversprechender Ansatz für zukünftige Optimierungen in der Transportlogistik. Durch die Verfügbarkeit von Desktop GIS-Systemen wird die notwendige Voraussetzung geschaffen, um die Forschungsergebnisse aus der Tourenplanung vorteilhaft in der Praxis einzusetzen. Das wird möglich, da einerseits die notwendigen Daten, wie z. B. Straßennetzinformation, Durchfahrzeiten von Straßenabschnitten verfügbar

werden und somit reale und brauchbare Distanzinformationen errechnet werden können. Und andererseits führt die Visualisierung auf realen Straßennetzen zu höherer Akzeptanz der Lösungen bei den Praktikern.

Für die computerunterstützte Berechnung von Lösungen für Tourenplanungsprobleme werden eine Reihe von kommerziellen Softwareprodukten wie beispielsweise ArcLogistics Route von der Firma ESRI bzw. Intertour von der Firma PTV angeboten. Aufgrund der besonderen Eigenschaften der Tourenplanungsprobleme im Gesundheitswesen – hoher Grad an Unsicherheit und Dynamik durch laufende Veränderung des Auftrages, Verderblichkeit der Güter – kann jedoch keines der verfügbaren Produkte für diese Anwendungsfälle eingesetzt werden, da insbesondere die Dynamiken aber auch Verderblichkeit und Lagerbestandsmanagement mit diesen Softwareprodukten nicht hinreichend genau modelliert werden können.

Eine Effizienzsteigerung von 10–20% durch den Einsatz von geographischen Informationssystemen und unter Verwendung von innovativen Optimierungsalgorithmen kann die Kosten für logistische Prozesse im Gesundheitswesen bei gleich bleibender oder gesteigerter Qualität maßgeblich reduzieren.

Danksagung

Diese Arbeit wurde teilweise durch den Fonds für wissenschaftliche Forschung (FWF Projekt L286-N04 der Universität Wien) unterstützt. ■

AUTORENKASTEN:

Univ.-Doz. Mag. Dr. Karl F. Doerner
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Forschungslinie Mobile und Web-basierte
Informationssysteme

Mag. Günter Kiechle
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Forschungslinie Mobile und Web-basierte
Informationssysteme

Salzburg Research Forschungsgesellschaft m.b.H.

Jakob Haringer Strasse 5/III

5020 Salzburg, Austria

Tel.: ++43 662 2288 422

Email: {Karl.Doerner, Guenter.Kiechle}@salzburgresearch.at ▶

Literatur:

- Beaudry, A.; Laporte, G.; Melo, T.; Nickel, S. (2006): Dynamic transportation of patients in hospitals. *Berichte des Fraunhofer ITWM*, Nr. 104.
- Brotcorne, L.; Laporte, G.; Semet, F. (2003): Ambulance location and relocation models. *European Journal of Operational Research* 147, S. 451-463.
- Cordeau, J.F.; Laporte, G. (2003): A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem. *Transportation Research B*, 37 S. 579-594.
- Cordeau, J.F.; Laporte G. (2007): The dial-a-ride problem: Models and algorithms. *Annals of Operations Research*, in Druck.
- Doerner, K.F.; Gronalt, M.; Hartl, R.F.; Kiechle G.; Reimann, M. (2007): Exact and heuristic algorithms for the vehicle routing problem with multiple interdependent time windows. *Computers & Operations Research*, in Druck.
- Doerner, K.F.; Gutjahr, W. J.; Hartl, R. F.; Karall M.; Reimann M. (2005): Heuristic Solution of an Extended Double-Coverage Ambulance Location Problem for Austria. *Central European Journal of Operations Research* 13 (4), S. 325--340.
- Doerner, K. F.; Hartl, R.F. (2007): Health care logistics, emergency preparedness, and disaster relief: new challenges for routing problems with a focus on the Austrian situation, In: Golden, B. et al. (Hrsg.): *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*, in Druck.
- Dorner T. (2006): Comparing location models for emergency vehicles in Vienna. *Diplomarbeit Universität Wien*.
- Gendreau, M.; Laporte, G.; Semet, F. (1997): Solving an ambulance location model by tabu search. *Location Science* 5(2), S. 75-85.
- Gendreau, M.; Laporte, G.; Semet, F. (2001): A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation. *Parallel Computing* 27, S. 1641-1653.
- Gendreau, M.; Laporte, G.; Semet F. (2006): The maximal expected coverage relocation problem for emergency vehicles. *Journal of the Operational Research Society*, 57, S. 22-28.
- Griffin, P.M.; Savelsbergh, M.W.P.; Swann, J.L. (2007): *The Health Care System: Operations Research and Improving Access*. zur Publikation eingereicht.
- Hemmelmayr, V.; Doerner, K.F.; Hartl, R.F.; Savelsbergh M.W.P. (2007): *Delivery strategies for periodic blood products supplies*. zur Publikation eingereicht.
- Kiechle, G.; Doerner, K.F. (2007): Ein Pilot-system zur Planung effizienter Touren für den Transport von Blutspenden. In: Strobl, J. et al. (Hrsg.): *Angewandte Geoinformatik, Beiträge zum 19. AGIT-Symposium, Salzburg, Wichmann:Heidelberg*, S. 326--331.
- Kiechle, G.; Doerner, K.F.; Gendreau, M.; Hartl, R.F. (2007): *Patient Transportation - Dynamic Dial-a-Ride and Emergency Transportation Problems*. Preprints of TRIS-TAN 2007
- Madsen, O.B.G.; Ravn, H.F.; Rygaard, J.M. (1995): A heuristic algorithm for a dial-a-ride problem with time windows, multiple capacities, and multiple objectives. *Annals of Operations Research*, 60, S. 193-208.
- Melachrinoudis, E.; Ilhan, A.B.; Min H. (2007): A dial-a-ride problem for client transportation in a health-care organization. *Computers & Operations Research*, 34, S. 742-759.
- Parragh, S.N.; Doerner, K.F.; Gandibleux, X.; Hartl, R.F. (2007): *A two-phase heuristic approach for the multi-objective dial-a-ride problem*. zur Publikation eingereicht.
- Stützle, T.; Dorigo, M. (2004): *Ant Colony Optimization*. MIT Press.
- Toth, P.; Vigo D. (1997): Heuristic algorithms for the handicapped persons transportation problem. *Transportation Science*, 31, S. 60-71.