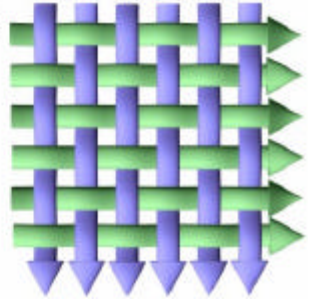


Sonderforschungsbereich 559

**Modellierung großer
Netze in der Logistik**



Technical Report 03029

ISSN 1612-1376

Entwicklung eines Bewertungsmodells für die Depotstandortoptimierung bei Servicenetzen

Teilprojekt A7:

Dipl.-Inform. Hilmar Heinrichmeyer

Teilprojekt M8:

Dipl.-Inform. Andreas Reinholz

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4
44227 Dortmund

Universität Dortmund
Fachbereich Informatik
Lehrstuhl für Systemanalyse
44227 Dortmund

Dortmund, 30.01.2004

1.1.1 Depotstandortoptimierung: Depot-Standort-Auswahl und Kunden-Depot-Zuordnung

Die Depot-Standort-Auswahl ist eine typische Planungsaufgabe, die im Rahmen von Optimierungsaufgaben großer Netze regelmäßig zu bearbeiten ist. Bei dieser Aufgabenstellung geht es darum, die optimale Anzahl und Lage von Depotstandorten zu ermitteln. Depotstandorte sind hierbei die Schnittstellen in dem Transportnetz von Speditionen und KEP-Diensten, an denen ein Umschlag der Sendungen zwischen dem Nahverkehr (Pick up and Delivery) und dem Fernverkehr erfolgt. Diese Schnittstelle wird in den Netzen vor allem aus zwei Gründen gebildet. Zum einen erfolgt die Zustellung und Abholung der Sendungen beim Kunden mit anderen Fahrzeugen als der Fernverkehr im Hauptlauf, da für die Abholung und Zustellung kleinere Fahrzeuge verwendet werden, mit denen beim Kunden besser rangiert werden kann und die im Stadtverkehr besser gehandhabt werden können. Der zweite Schnittstellenaspekt der Depots besteht darin, dass eine Konsolidierungsstation für die Sendungen benötigt wird, um Transportmengen für gleiche Zielregionen zusammen zu führen. Die Depots übernehmen genau diese Aufgabe im Transportnetz.

Die Planungsaufgabe der Depot-Standort-Auswahl (Optimierungsaufgabe 1/OA 1) wird in aller Regel zusammen mit der Kunden-Depot-Zuordnung (OA 2) bearbeitet, da bei der Bestimmung der optimalen Anzahl und Lage der Depotstandorte immer auch die Frage beantwortet werden muss, welche Kunden von diesen Standorten aus bedient werden, d.h. in Bezug auf welche Kunden die Lage der Standorte optimal ist. Diese Aufgabenstellung kann bei bestehenden Depotstandorten allerdings auch eigenständig ausgeführt werden, wobei dann für jeden Kunden festzulegen ist, welchem der bestehenden Depotstandorte dieser Kunde zugeordnet wird, wobei neben den Transportentfernungen in aller Regel Kapazitätsrestriktionen der Depotstandorte zu berücksichtigen sind.

Diese beiden Planungsaufgaben bilden die Grundlage für die weitergehenden Planungsaufgaben der Hub-Standort-Auswahl und der Depot-Hub-Zuordnung. Diese setzen eine bestehende Menge von Depotstandorten voraus, zwischen denen dann ein Transportnetz zu optimieren ist. Bezogen auf das Gesamtergebnis des Transportnetzes können die Aufgabenstellungen nicht unabhängig voneinander betrachtet werden, da die Kosten des Transportnetzes von der Anzahl und Lage der Depotstandorte abhängig sind, ebenso wie die Kosten des Vor- und Nachlaufs. Ein Gesamtoptimum für die Transportnetzplanung ist also nur zu erreichen, wenn die Kombination beider Problemstellungen optimal gelöst wird.

Da es sich bei diesen Problemstellungen jedoch um mathematisch komplexe Aufgaben handelt, die das Kriterium der NP-Vollständigkeit erfüllen, d.h. von denen nicht zu erwarten ist, dass es Algorithmen gibt, die für Systeme ab einer bestimmten Größe diese Aufgaben in akzeptabler Rechenzeit optimal lösen können, besteht die übliche Strategie zur Lösung dieser Aufgaben in einer Dekomposition der Problemstellungen. Die Aufgabenstellungen werden dabei sequentiell bearbeitet und in Form einer Szenarienbetrachtung zu einem Gesamtergebnis zusammengeführt.

Auf Grund praktischer Erfahrungen ist bekannt, dass die Aufgabenstellung der Depot-Standort-Auswahl hauptsächlich von den Vor- und Nachlaufkosten getrieben werden. Dies ergibt sich aus dem Verhältnis der Hauptlaufkosten zu den Vor- und Nachlaufkosten, die typischerweise im Verhältnis 1:5 bis 1:10 liegen. Dieses Verhältnis ergibt sich aus der Tatsache, dass das Transportvolumen der Hauptlauffahrzeuge deutlich größer ist als das der Nahverkehrsfahrzeuge, so dass weniger Transporte im Hauptlauf als im Vor- und Nachlauf benötigt werden. Zum anderen gibt es sehr viel mehr Kunden als Depots, so dass auch die Anzahl der zu bedienenden Stationen im Nahverkehr sehr viel größer ist als im Hauptlauf.

Die Aufgabe der Depot-Standort-Auswahl wird aus diesem Grund als eigenständige Problemstellung wie folgt definiert: Gegeben sei eine Menge von m Standortkandidaten sowie eine Menge K von Kunden, die von diesen Standorten aus bedient werden. Weiterhin gibt es eine Entfernungsfunktion $d: U \times F \rightarrow \mathbb{R}^+$ sowie eine Konstante $p \in \mathbb{N}$, die die Anzahl der gesuchten Depots beschreibt, mit denen die Summe der Distanzen von jedem Kunden zum nächstgelegenen Depot minimiert wird. Diese Problemstellung wird als p -median-Problem bezeichnet.

Zur Lösung dieses Problems sind in der Literatur sehr viele Verfahren beschrieben worden, bei denen es sich grundsätzlich um Heuristiken handelt, da das Problem NP-vollständig ist. Eine bekannte Heuristik ist das Verfahren von Whitaker [Whi83], welches als „fast interchange heuristic“ bezeichnet wird.

Bei dem p -Median-Problem handelt es sich um ein unkapazitiertes Optimierungsproblem, d. h. es gibt keine Beschränkung der Kapazität der einzelnen Depotstandorte. Für praktische Problemstellungen kann diese Annahme jedoch nur selten aufrecht gehalten werden. Hierbei gibt es zwei unterschiedliche Fälle, die relevant sind:

1. prinzipbedingte Kapazitätsrestriktionen,
2. konkrete Kapazitätsrestriktionen bestehender Standorte.

Prinzipbedingte Kapazitätsrestriktionen ergeben sich daraus, dass es organisationsbedingte Mindestgrößen und Maximalkapazitäten gibt. Die Mindestgrößen ergeben sich daraus, dass eine ganzzahlige Anzahl von Fahrzeugen und Fahrern an diesen Standorten stationiert sind. Wird ein Standort und damit die zu fahrende Anzahl von Nahverkehrstouren an diesem Standort zu klein, ergeben sich zu große Verschnittanteile bezüglich der Einsatzzeit der Fahrer und der Betriebszeit der Fahrzeuge. Bei zu großen Standorten ergeben sich Organisationsprobleme durch die Größe der Halle und die dabei zurückzulegenden Wege sowie durch den großen Flächenbedarf für den Standort. Die konkreten Werte für Unter- und Obergrenzen der Standorte sind dabei unternehmensspezifisch und hängen unter anderem von den zu transportierenden Produkten ab.

Konkrete Kapazitätsrestriktionen ergeben sich immer dann, wenn Standorte vorhanden sind, die bei der Planung zu berücksichtigen sind. Sind alle Standorte bekannt, so ergibt sich das sogenannte Transportproblem, und es kann eine optimale Zuordnung der Kunden zu den Depots mit Hilfe bekannter Verfahren zur Lösung des Transportproblems ermittelt werden.

1.1.2 Berücksichtigung von Kapazitätsrestriktionen bei der Depot-Standort-Auswahl

Im Rahmen des Teilprojektes A7 wurde mit realen Daten eines großen deutschen Logistikunternehmens eine konkrete Depotstandortoptimierung durchgeführt. Bei der Problemstellung handelt es sich um eine Optimierung mit prinzipbedingter Kapazitätsrestriktion. Als Besonderheit kommt hinzu, dass die Optimierung für geographisch nicht zusammenhängende Gebiete erfolgt, wobei a priori nicht feststeht, dass jedes Gebiet ein eigenes Depot erhält, weshalb die Optimierung nicht in einzelne Teilprobleme aufgeteilt werden kann.

Für diese Aufgabenstellung wurde ein Optimierungsverfahren auf Basis des von Whitaker beschriebenen Verfahrens implementiert. Zur Berücksichtigung der prinzipbedingten Kapazitätsrestriktionen mussten jedoch einige Modifikationen des Originalverfahrens vorgenommen werden. Die Kapazitätsrestriktion ergibt sich aus der Anzahl minimal bzw. maximal vorhandener Tore der Depotstandorte. Diese begrenzen die Anzahl der Touren, die gleichzeitig von dem Standort starten können, da jede Tour ein Tor belegt. Die Bewertung der Standortkonstellationen mittels der definierten Kennzahl „Standortszenarienkosten“ kann also nicht wie in dem Originalverfahren einfach auf Basis der Entfernung zwischen den Kunden und den Depots ermittelt werden. Auch ergibt die Transportmenge keinen direkten Indikator für die Touranzahl, da in ländlichen Gebieten die Fahrzeit den begrenzenden Faktor der Tour darstellt, während in städtischen Gebieten die Fahrzeugkapazität die einzelnen Touren begrenzt. Eine detaillierte Berechnung der Touren im Rahmen des Optimierungsverfahrens scheidet jedoch aus, da die Anzahl der Kunden pro Standort bis zu 20.000 betragen kann, es sich also um ein sehr rechenaufwendiges Problem handelt.

Zur Ermittlung der Tourenanzahl wurde deshalb eine Näherung verwendet, die den Fahrzeitanteil einer Tour auf der Basis der Entfernung zwischen Depot und Kunde approximiert. In ländlichen Gebieten sind die Fahrstrecken zwischen dem Depot und dem Kunden höher als in städtischen Regionen. Im Rahmen des Optimierungsverfahrens wird nun ein fester Prozentsatz der Entfernung zwischen Depot und Kunde als Fahrzeitanteil berücksichtigt, der die Kapazität des Fahrzeuges reduziert. Durch diese rechnerische Kapazitätsreduktion ergeben sich in Regionen mit weiteren Entfernungen zwischen Kunden und Depot Touren, die bezüglich der Transportmenge schlechter ausgelastet sind als in Regionen, in denen die Distanz zwischen Kunden und Depots sehr gering ist. Die mittleren Fahrzeugauslastungsgrade konnten über diesen Ansatz den tatsächlichen, im betrieblichen Einsatz aufgezeichneten Auslastungsgraden recht gut angepasst werden.

Die auf diese Weise ermittelte Touranzahl wird dann mit der vorgegebenen Maximaltoursanzahl verglichen, und bei Überschreitung der Grenzen wird der Standort mit Strafkosten – proportional zum Grad der Grenzüberschreitung – belastet. Im Gegensatz zu anderen Verfahren, die für die Standortoptimierung unter Beachtung von Kapazitätsrestriktionen in der Literatur beschrieben sind, erfolgt die Zuordnung von Kunden zu Depots auf der Basis der kürzesten Fahrzeit und wird

nicht wegen der vorhandenen Kapazitätsrestriktionen modifiziert, wie dies beim Transportproblem gemacht wird. Eine Lösung, bei der die Kennzahl „Standortszenarienkosten“ keine Strafkosten enthält, bedeutet also, dass eine Standortkombination gefunden wurde, bei der alle Kunden nach kürzester Entfernung zugeordnet sind und keine Standortkapazität über- oder unterschritten wurde. Diese Konstellation lässt ein besseres Gesamtergebnis erwarten als eine Lösung, bei der Kunden auf Grund von Kapazitätsrestriktionen nicht dem nächstgelegenen, sondern weiter entfernten Standorten zugeordnet werden. Es ist bei dieser Vorgehensweise jedoch nicht garantiert, dass immer eine Lösung ohne Strafkosten gefunden werden kann. Dies kann nur dann erfolgen, wenn genügend Standortkandidaten zur Auswahl stehen, die Anzahl p von Standorten groß genug ist, um alle Kundennachfragen bedienen zu können und die Kapazitätsrestriktionen nicht zu eng sind.

1.1.3 Berechnung der Kennzahl „Standortszenarienkosten“

Nach dieser Motivation der Kennzahl „Standortszenarienkosten“ (SZK) wird die exakte Berechnung im Folgenden näher beschrieben. Zum besseren Verständnis sei bereits an dieser Stelle erwähnt, dass alle „Kosten“ in der Einheit „Minuten“ ermittelt werden, welche später - um zu Währungsbeträgen zu kommen - mit einem Kostensatz pro Minute multipliziert werden können.

$$SZK = TK + TSK + PSK$$

mit TK = Transportkosten; TSK = Touren-Strafkosten, PSK = Paket-Strafkosten.

1.1.4 Herleitung der Transportkosten

$$TK = \sum_{k \in K} FZ_{D_k, S_k} \cdot \frac{AP_k}{ATBK_{D_k, S_k}} + \sum_{k \in K} FZ_{D_k, S_k} \cdot \frac{ZP_k}{ZTBK_{D_k, S_k}}$$

Dabei bedeuten: FZ = Fahrzeit, D = Depot, S = Standort, AP = Abgangspakete, $ATBK$ = Abgangstouren-Beladepazität, ZP = Zugangspakete, $ZTBK$ = Zugangstouren-Beladepazität.

Die Transportkosten werden durch die Einsatzzeit der Fahrzeuge für die Sammeltouren (Abgangstouren) und die Verteiltouren (Zugangstouren) repräsentiert. Dazu werden die Fahrzeug-Einsatzminuten für jeden Kunden unter Berücksichtigung seiner Entfernung zum nächsten Depot, seiner Abgangsmenge, seiner Zugangsmenge sowie der maximalen Fahrzeug-Beladepazität errechnet. Dabei wird zunächst für jeden Kunden sowohl für seine Abgangsmenge als auch für seine Zugangsmenge seine mengenbezogene Touren-Inanspruchnahme ermittelt. Diese gibt an, wie viel Prozent einer Sammeltour bzw. einer Verteiltour für diesen Kunden aufgebracht werden muss.

Für die Berechnung der mengenbezogenen Abgangstouren-Inanspruchnahme wird die Abgangsmenge des Kunden (in Paketen) durch die Beladepazität eines

Fahrzeuges (in Paketen) geteilt. Diese Beladepkapazität für Abgangstouren wurde für die bislang vorgenommenen Berechnungen auf 250 Pakete gesetzt und wird um die halbe Fahrzeit für die Strecke zwischen Depot und Kunde (mindestens jedoch 5 Minuten und maximal 260 Minuten) reduziert. Dieser Reduzierung der Kapazität um die halbe Fahrzeit liegt der im dritten Absatz beschriebene Gedanke zugrunde, dass bei großen Entfernungen zwischen Depot und Kunden die Tourenbildung weniger von der Beladepkapazität der Fahrzeuge beeinflusst wird als von der zurückzulegenden Fahrzeit. Die genannten Parameterwerte (Mindestfahrzeit 5 Min., Maximalfahrzeit 260 Min., Fahrzeit-Teiler 2) wurden für die bisher bearbeitete Aufgabenstellung durch Experiment ermittelt und ergaben beim Vergleich mit der betrieblichen Praxis eine ausreichende Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis. Für andere Depot-Standortoptimierungsaufgaben müssen ggf. andere Parameterwerte verwendet werden.

Analog zu den Abgangstouren erfolgt die Berechnung der Zugangstouren-Inanspruchnahme durch Division der Zugangsmenge des Kunden (in Paketen) durch die Fahrzeugkapazität (in Paketen), die für den konkreten Fall auf 200 Pakete heruntergesetzt wurde, weil dort für eine Zugangstour grundsätzlich weniger Zeit zur Verfügung steht als für eine Abgangstour. Die Summe aus mengenbezogener Abgangstouren- und Zugangstouren-Inanspruchnahme wird abschließend mit der wie oben beschrieben begrenzten Fahrzeit für die Strecke zwischen Depot und Kunde multipliziert, um die Fahrzeug-Einsatzminuten des einzelnen Kunden zu erhalten. Die Summe der Fahrzeug-Einsatzminuten aller Kunden ergibt den Transportkostenanteil TK der Kennzahl SZK.

1.1.5 Herleitung der Touren-Strafkosten

$$TSK = \sum_{d \in D} \left(AT_{sk,var} * AT_d + ATOG \right) + \sum_{d \in D} \left(ZTSK_{var} * ZT_d + ZTOG \right)$$

d? D mit AT_d? ATOG d? D mit ZT_d? ZTOG

Es bedeuten: ATSK = Abgangstouren-Strafkosten, AT = Abgangstouren, ATOG = Abgangstouren-Obergrenze, ZTSK = Zugangstouren-Strafkosten, ZT = Zugangstouren, ZTOG = Zugangstouren-Obergrenze.

Für die Ermittlung der Touren-Strafkosten werden – getrennt nach Abgangstouren und Zugangstouren – alle Depots mit Strafkosten (Strafminuten) belegt, die zu viele Abgangstouren bzw. Zugangstouren durchführen müssen. Die Anzahl der Abgangstouren eines jeden Depots wird berechnet, indem die oben beschriebene mengenbezogene Abgangstouren-Inanspruchnahme aller Kunden dieses Depots summiert wird. Sofern die Abgangstourenanzahl eines Depots größer ist als eine festzulegende Obergrenze, werden für jede Tour über der Obergrenze variable Abgangstourenstrafkosten fällig. Analog werden die Zugangstourenstrafkosten ermittelt. Im bislang berechneten Anwendungsfall wurden die Sammeltouren nicht berücksichtigt, weil für diese mehr Zeit zur Verfügung steht, sodass diese leichter auf die nur begrenzt zur Verfügung stehenden Tore aufgeteilt werden können, während die Verteiltouren aufgrund ihrer nahezu identischen Startzeit um die zur Verfügung stehenden Tore konkurrieren. Daher wurde im konkreten Fall mit den folgenden Parameter-Einstellungen gearbeitet: ATSK_{var} = 0, ATOG = 120, ZTSK_{var} = 1.000.000 Fahrzeug-Einsatzminuten, ZTOG = 120.

1.1.6 Herleitung der Paket-Strafkosten

$$PSK_d = \begin{cases} APSK_{fix} & \text{falls } AP_d \geq APOG \\ APSK_{fix} + \frac{APSK_{var} * (AP_d - APOG)}{APOG - APOG} & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{falls } D \text{ mit } AP_d \geq APOG$$

$$ZPSK_d = \begin{cases} ZPSK_{fix} & \text{falls } ZP_d \geq ZPOG \\ ZPSK_{fix} + \frac{ZPSK_{var} * (ZP_d - ZPOG)}{ZPOG - ZPOG} & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{falls } D \text{ mit } ZP_d \geq ZPOG$$

mit APSK = Abgangspaket-Strafkosten, APOG = Abgangspakete-Obergrenze, ZPSK = Zugangspaket-Strafkosten, ZPOG = Zugangspakete-Obergrenze.

Die Paket-Strafkosten fallen für Depots an, bei denen im Abgang und/oder im Zugang mehr Pakete verarbeitet werden müssen als ihre Kapazität erlaubt. Daher wird für jedes Depot geprüft, ob die Summe aller Pakete aller Kunden dieses Depots eine zuvor festgesetzte Obergrenze überschreitet. Sofern das der Fall ist, fällt für das von dieser Kapazitätsüberschreitung betroffene Depot ein fixer Paketstrafkostenanteil sowie ein variabler Anteil für jedes Prozent Kapazitätsüberschreitung an. Im konkreten Anwendungsfall stellte die Paketmenge der einzelnen Depots nur zugangsseitig einen beschränkenden Faktor dar, so dass hier die beiden abgangsseitigen Parameter APSKfix und APSKvar jeweils auf 0 gesetzt wurden. Für die Zugangsseite wurde mit den Parametereinstellungen ZPSKfix = 1.000.000 Fahrzeug-Einsatzminuten bzw. ZPSKvar = 100.000 Fahrzeug-Einsatzminuten für jedes Prozent Kapazitätsüberschreitung sowie mit APOG = ZPOG = 24.000 gerechnet.