

# Tourenplanung in einer Distributionskooperation komplementärer Lieferanten

Andrea Nagel\*, Giselher Pankratz\*\*, Hermann Gehring\*\*\*

\* FernUniversität in Hagen, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik,  
E-Mail: andrea.nagel@fernuni-hagen.de

\*\* FernUniversität in Hagen, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik,  
E-Mail: giselher.pankratz@fernuni-hagen.de

\*\*\* FernUniversität in Hagen, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik,  
E-Mail: hermann.gehring@fernuni-hagen.de

## Abstract

Die Planungssituation einer Distributionskooperation von vier mittelständischen Lieferanten hochwertiger Lebensmittel und Getränke bildete die Grundlage für die Analyse eines komplexen Transportdispositionsproblems. Dieses Problem stellt sich, wenn die kooperierenden Lieferanten die tägliche Planung ihrer Distributionsaktivitäten unternehmensübergreifend koordinieren. Das Problem ist durch einen dynamischen Auftragseingang, individuelle Zeitfenster zur Auslieferung der Aufträge, einen heterogenen Fuhrpark mit mehrdimensionalen Kapazitätsgrenzen der Lieferfahrzeuge und eine simultane Planung von Eigentransport und Fremdvergabe charakterisiert. Das zur Lösung dieses Problems entwickelte Verfahren kombiniert eine Large-Neighborhood-Suchstrategie zur Lösungsverbesserung mit einem Threshold-Accepting-Verfahren zur Überwindung lokaler Minima. Bisherige Tests ergaben bei Kooperation ein Einsparpotenzial von durchschnittlich 22% gegenüber der Situation ohne Kooperation.

*Keywords: Distributionskooperation, kollaborative Tourenplanung, Rich Vehicle Routing Problem*

## 1 Einleitung

Beständig steigende Logistikkosten und ein scharfer Preiswettbewerb zwingen viele Zulieferunternehmen dazu, alle Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung in der Distributionslogistik zu nutzen. Gleichzeitig gewinnt die Qualität der Distributionslogistik in den hart umkämpften Märkten als wichtiger strategischer Erfolgsfaktor zunehmend an Bedeutung. Eine einzelwirtschaftliche Optimierung der Distributionsprozesse ist zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit für viele Unternehmen nicht ausreichend. Insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) bieten häufig erst eine unternehmensübergreifende Zusammenarbeit und der Aufbau intelligenter Lösungen

zur Konsolidierung und Koordination der Transportaktivitäten das Potential für eine deutliche Effizienzverbesserung.

In diesem Zusammenhang betrachtet der vorliegende Beitrag den realen Fall einer Distributionskooperation zwischen vier kleinen und mittleren Unternehmen der Lebensmittel- und Getränkebranche.

Die Unternehmen haben sich jeweils in einem der Bereiche Fleisch, Fisch, Obst und Fruchtsäfte spezialisiert. Das daraus resultierende komplementäre Produktangebot bietet, verbunden mit dem sich daraus ergebenden geringen Konfliktpotential, eine gute Grundlage für eine stabile und erfolgreiche Kooperation. Signifikante Überschneidungen im Kundenkreis offenbaren zusätzliches Optimierungspotenzial. Ihren Frei-Haus-Lieferservice sehen alle vier Unternehmen als integralen Bestandteil ihrer Dienstleistung an. Zwei der Unternehmen besitzen einen eigenen Fuhrpark zur Auslieferung von Aufträgen, wodurch sie flexibler auf Auftragseingänge reagieren können.

Steigende Kundenanforderungen an eine zeitnahe Belieferung auch kleiner Mengen (<20kg) stellen ebenso einen aktuellen Trend dar wie die wachsende Konkurrenz durch Vollsortimenter, deren Vorteil vor allem in der Belieferung „aus einer Hand“ besteht. Stark schwankende Bestellmengen erschweren dem einzelnen Lieferanten zudem eine passgenaue Dimensionierung seiner Distributionslogistik. Eigene Fahrzeuge können zeitweise nur schlecht ausgelastet werden, während zu Zeiten mit Bedarfsspitzen auf zusätzliche externe Dienstleister zurückgegriffen werden muss. Letzteres soll auf das notwendige Maß beschränkt werden, da eine expeditionelle Frei-Haus-Belieferung zum Wunschtermin bei relativ kleinen Sendungsgrößen hohe Kosten verursacht und darüberhinaus den Verlust von Kundennähe mit sich bringt.

Insbesondere der genannte Verlust der Kundennähe sowie die geringere Flexibilität der Unternehmen bei sehr kurzfristig auftretendem Bedarf sind Gründe dafür, warum ein komplettes Outsourcing der Distribution keine relevante Option darstellt.

Das Ziel einer Distributionskooperation der vorgestellten Lieferanten besteht in der Etablierung eines „virtuellen Vollsortimenters“. So können die Unternehmen in ihrem jeweiligen Segment spezialisiert bleiben und gleichzeitig ihren Kunden eine Belieferung „aus einer Hand“ bieten, wodurch auch eine Verstärkung der Kundenbindung erreicht werden soll. Weiterhin erwarten die Unternehmen eine Senkung der individuellen Logistikkosten sowie die Verbesserung der Transportmittelauslastung aufgrund der Synergieeffekte einer gemeinsam organisierten Auslieferung.

Im Rahmen des vom BMWI geförderten Forschungsprojekts iCoTrans (Intelligente kooperative Transportplanung in einer Allianz komplementärer Lieferanten) soll ein Verfahren entwickelt werden, das die koordinierte tägliche Disposition der Aufträge und Transportmittel in der beschriebenen Distributionskooperation unterstützt und gleichzeitig schnell und effizient auch auf kurzfristige Ereignisse reagieren kann. Die anfallenden gesamten Transportkosten sollen transparent und fair auf die beteiligten Partner umgelegt werden. Die vorliegende Untersuchung widmet sich der vorrangigen Minimierung der Distributionskosten mit Hilfe eines metaheuristischen Verfah-

rens. Die Bestimmung einer fairen Kostenallokation ist Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten.

Der vorliegende Beitrag ist wie folgt aufgebaut: Nach dieser Einleitung wird im folgenden Abschnitt 2 das betrachtete Problem der konsolidierten Transportdisposition genauer beschrieben und analysiert. Abschnitt 3 stellt den derzeitigen Stand der Verfahrensentwicklung vor. In Kapitel 4 werden der Testaufbau sowie Testergebnisse des Verfahrens präsentiert und diskutiert. Ein kurzer Ausblick auf laufende und zukünftige Forschungsarbeiten schließt den Beitrag ab.

## **2 Problembeschreibung**

Nach der kurzen Einführung in die Ausgangslage der Distributionskooperation im vorangehenden Kapitel wird in den nun folgenden Abschnitten das Problem genauer beschrieben und abgegrenzt.

### **2.1 Distributionsstruktur innerhalb der Kooperation**

Wie bereits erwähnt, verfügen zwei der beteiligten Unternehmen über einen eigenen Fuhrpark zur Auslieferung von Aufträgen. Um auch Kunden an vom Unternehmensstandort weiter entfernten Orten aus eigener Hand beliefern zu können, wurden regionale Verteilzentren eingerichtet, an denen sich ebenfalls eigene Fahrzeuge befinden. Um die Waren dorthin zu bringen, werden Speditionen mit Sammellieferungen beauftragt. Aufträge, die nicht mit eigenen Fahrzeugen ausgeliefert werden können, werden an Kurierdienste fremdvergeben. Die Distributionsstruktur der Kooperation wird in Abbildung 1 schematisch am Beispiel eines Lieferanten mit eigenem Fuhrpark und einem Lieferanten ohne eigene Lieferfahrzeuge verdeutlicht. Die Möglichkeiten der Kundenbelieferung stellen sich anhand dieser Struktur wie folgt dar (vgl. Fälle a bis e in Abb. 1):

- a) Direkte Lieferung von Lieferant 1 an den Kunden mit eigenem Fahrzeug vom eigenen Unternehmensstandort aus.
- b) Lieferung von Lieferant 1 an den Kunden mit externem Logistikdienstleister vom eigenen Unternehmensstandort aus.
- c) Indirekte Lieferung des Lieferanten 1 mit einem externen Logistikdienstleister an ein Abhollager in der Zielregion, anschließend Auslieferung von dort mit eigenem Fahrzeug an den Kunden.
- d) und e) Indirekte Lieferung des Lieferanten 2 mit einem externen Logistikdienstleister an ein Abhollager oder an den Standort eines kooperierenden Unternehmens in der Zielregion, anschließend Auslieferung von dort mit einem Fahrzeug eines Kooperationspartners.

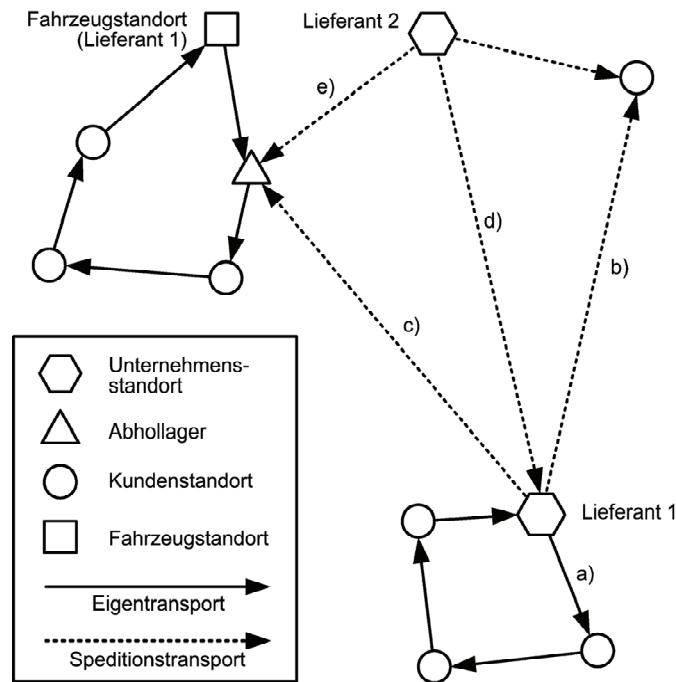


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Distributionsstruktur am Beispiel zweier Lieferanten.

## 2.2 Vorüberlegungen zur Behandlung der Problemdynamik

Kennzeichnend für die Disposition in einem dynamischen Umfeld ist das sukzessive Eintreten von Ereignissen, welche eine laufende Anpassung der Planung erfordern.

Im vorliegenden Fall wünschen die Kunden der Kooperationspartner in der Regel eine Belieferung bis zum nächsten Tag. Die dafür ggf. notwendigen Fremdtransporte werden im Nachtsprung durchgeführt, d.h. die eintreffenden Aufträge müssen noch am selben Tag versandbereit fertiggestellt, einem Verteilzentrum zugeordnet und an den dafür geeigneten Fremddienstleister übergeben werden.

Hauptfaktoren für die Dynamik der hier betrachteten Planungssituation sind zum einen die über den Tag verteilt eintreffenden Aufträge, die eine laufende Aktualisierung des Auslieferungsplans erfordern. Zum anderen sind für die geplanten Fremdtransporte Vorankündigungs- und Abholfristen der jeweiligen Dienstleister einzuhalten. Mit einer Vorankündigung an einen externen Transportdienstleister wird die Auslieferungsvariante aller Aufträge, die gemäß dem aktuellen Planungsstand mit diesem Dienstleister befördert werden sollen, festgelegt und kann in der weiteren Planung nicht mehr geändert werden. Auch können diesem Dienstleister keine neu eintreffenden Aufträge mehr zugeordnet werden. Da zum Zeitpunkt der Vorankündigung jedoch bei weitem noch nicht alle Aufträge bekannt sind, erfolgt die Planung diesbezüglich unter unvollständiger Information.

Prinzipiell führt jedes der genannten Ereignisse zu einer Änderung der bis dahin gültigen Problemstellung, welche dem angestrebten Planungsverfahren zur Bearbeitung und Lösung übergeben wird. Da jeder Auftrag zunächst gefertigt bzw. kommissioniert werden muss, erfordert das Eintreffen eines neuen Auftrags aus Distributionsicht jedoch meist keine unmittelbare Reaktion. In aller Regel genügt eine Aktualisierung

der Problemstellung in äquidistanten Zeiträumen von beispielsweise 10 Minuten. Aufträge, die zwischen zwei Aktualisierungen eintreffen, werden bis zum nächsten Aktualisierungszeitpunkt gepuffert. Zusätzlich zu diesen regelmäßigen Planrevisionen wird immer kurz vor Fälligwerden einer Vorankündigung an einen externen Dienstleister eine Planaktualisierung ausgelöst. Das dynamische Problem wird auf diese Weise als eine Sequenz temporärer, statischer Probleme aufgefasst. Dieses Konzept verdeutlicht Abbildung 2. Darin wird das temporäre statische Problem zur Zeit  $t$  mit  $P_t$  bezeichnet. Jedes temporäre Problem entsteht aus dem vorangehenden durch Integration der bis dahin aufgelaufenen planungsrelevanten Ereignisse. So sind z.B. erledigte Aufträge zu eliminieren, neu eingetroffene Aufträge hinzuzufügen sowie die Informationen über Verfügbarkeit und Ausführungszustand der Transportmittel zu aktualisieren.

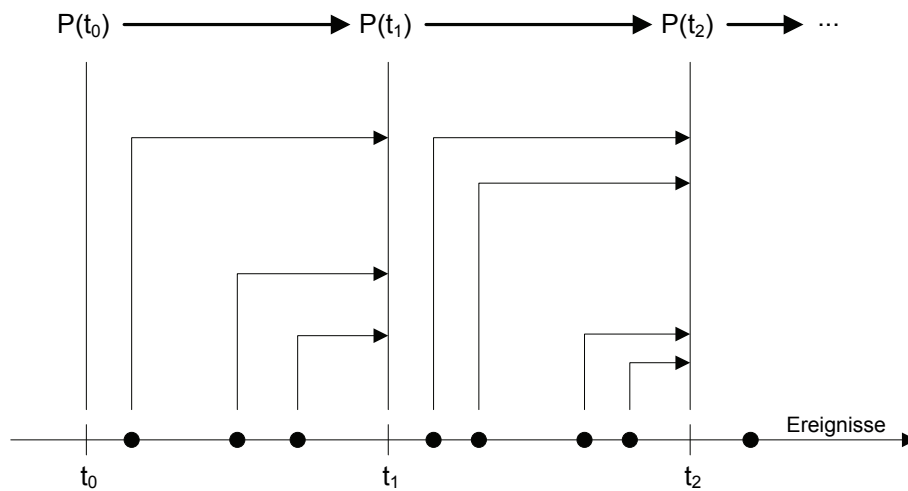


Abbildung 2: Rollierendes Planungskonzept.

### 2.3 Repräsentation der Problem Daten

Die für die Definition eines temporären statischen Problems  $P_t$  notwendigen Daten werden im Folgenden dargestellt. Für die Repräsentation der Problem Daten wird eine Struktur in Anlehnung an [PS08] verwendet, die für die Aufnahme dynamischer Aspekte angepasst wurde.

Zur Darstellung der räumlichen Gegebenheiten wird zunächst ein gewichteter Digraph  $G = (V, E, d)$  eingeführt. Die Knotenmenge  $V$  enthält alle für die Planungssituation relevanten Orte wie Unternehmensstandorte  $v^o$ , Abholläger  $v^u$ , Kundenstandorte  $v^d$  und Fahrzeugstandorte  $v^h$ . Die Pfeile in  $E$  verbinden je zwei Knoten  $u$  und  $v$ ,  $u, v \in V$ . Die kürzeste Strecke zwischen zwei Orten wird durch das Gewicht  $d(u, v)$  erfasst.  $O = \{o_1, \dots, o_n\}$  sei die Menge der Kooperationspartner.

$R_t$  sei die Menge aller zum Planungszeitpunkt vorliegenden Transportaufträge. Ein Transportauftrag  $r \in R_t$ ,  $r = (o, v^s, v^d, q_v, q_w, \tau)$  wird durch das Unternehmen  $o$ , bei dem der Auftrag eingeht, den Ort der ersten Güterbereitstellung  $v^s$ , den Kundenstandort  $v^d$  an dem der Auftrag ausgeliefert werden soll, den volumen- und ge-

wichtsmäßigen Kapazitätsbedarf  $q_v$  bzw.  $q_w$  sowie den spätesten Liefertermin  $\tau$  charakterisiert.

Der Vektor  $t^{kom}(t)$  enthält für jeden zum Zeitpunkt  $t$  bekannten Auftrag  $r \in R_t$  den Zeitpunkt  $t_r^{kom}$ , zu dem dieser voraussichtlich versandbereit ist. Vor diesem Zeitpunkt darf ein Auftrag nicht verladen bzw. ausgeliefert werden. Dieser Zeitpunkt wird erst nach Eintreffen des Auftrags bekannt und kann sich im Laufe der Auftragsbearbeitung mehrfach ändern.

Die Menge der Auslieferungsfahrzeuge, die zur Zeit  $t$  zur Verfügung stehen, sei  $A_t$ . Ein Fahrzeug  $a \in A_t$ ,  $a = (o, v^h, v^u, q_v^{max}, q_w^{max}, t^{max}, c^{route})$  wird bestimmt durch den Kooperationspartner  $o$ , der das Fahrzeug besitzt, den Fahrzeugstandort  $v^h$ , das dem Fahrzeug zugeordnete Abhollager  $v^u$ , von dem es die Aufträge zur Auslieferung aufnimmt, die maximal zulässige Zuladung bezogen auf Volumen  $q_v^{max}$  und Gewicht  $q_w^{max}$ , die maximale Einsatzdauer des Fahrzeuges pro Tag  $t^{max}$  sowie eine Kostenfunktion  $c^{route}$  für den Einsatz des Fahrzeuges.

Die zum Zeitpunkt  $t$  verfügbaren Transportdienstleister  $l = (v^o, t^{avis}, c^{freight})$  sind in der Menge  $L_t$  zusammengefasst. Dabei bezeichnet  $v^o$  den Standort des Unternehmens, von dem der Transport startet,  $t^{avis}$  den Vorankündigungszeitpunkt, zu dem die Auftragszuordnung zu diesem Dienstleister abgeschlossen wird, und  $c^{freight}$  die Kostenfunktion für den Einsatz des Dienstleisters.

Bestehen innerhalb der Kooperation Einschränkungen bezüglich der gegenseitigen Zurverfügungstellung von Auslieferungsfahrzeugen, wird dies durch eine Funktion  $z: O \times O \rightarrow \{true, false\}$  zum Ausdruck gebracht. Diese Funktion gibt für jedes Paar  $(o_1, o_2)$  mit  $o_1, o_2 \in O$  an, ob Fahrzeuge des Kooperationspartners  $o_1$  zur Beförderung von Aufträgen des Unternehmens  $o_2$  verwendet werden können.

Aus dem Digraphen  $G$ , der Menge der Kooperationspartner  $O$ , der Menge der zur Zeit  $t$  bekannten Aufträge  $R_t$  mit ihren zugehörigen Fertigstellungszeiten  $t^{kom}(t)$ , sowie der zur Zeit  $t$  zur Verfügung stehenden Lieferfahrzeuge  $A_t$  und Transportdienstleister  $L_t$  und der Funktion  $z$  zur Festlegung der wechselseitigen Bereitstellung von Auslieferungsfahrzeugen zwischen den Unternehmen entsteht so ein konkretes temporäres Planungsproblem  $P_t = (G, O, R_t, t^{kom}(t), A_t, L_t, z)$ .

## 2.4 Planungsaufgabe

Die folgende Beschreibung der betrachteten Planungsaufgabe beschränkt sich auf die Darstellung des statischen Problemaspekts. Die Berücksichtigung der dynamischen Problemeigenschaften erfolgt nach den in Abschnitt 2.2 erläuterten Prinzipien. Zur Lösung eines temporären statischen Problems  $P_t$  gilt es, eine Aufteilung der Aufträge in eigen- und fremdausgelieferte Aufträge derart zu finden, dass die gesamten anfallenden Distributionskosten innerhalb der Kooperation minimiert werden. Die ein-

zelen interdependenten Aufgaben, die dabei simultan zu berücksichtigen sind, werden im Folgenden beschrieben:

- Aus der Menge  $R_t$  der vorliegenden Aufträge ist die Teilmenge  $R_t^{own}$  derjenigen Aufträge zu bestimmen, die – sei es direkt oder indirekt – unter Verwendung der Kooperationsfahrzeuge ausgeliefert werden sollen. Die Restmenge  $R_t^{sub} = R_t \setminus R_t^{own}$  enthält somit alle Aufträge, die direkt per Kurier vom Unternehmensstandort zum Kunden transportiert werden.

- Jeder Auftrag  $r \in R_t^{own}$  ist genau einem Fahrzeug  $a \in A_t$  zuzuordnen. Für die Menge  $X_t \subset R_t^{own}$  der dem Fahrzeug  $a$  zugeordneten Aufträge ist ein Traveling-Salesman-Problem (TSP) zu lösen, d.h. es ist eine Fahrzeugroute  $\pi$  durch alle Kundenstandorte der in  $X$  enthaltenen Aufträge  $r$  zu bestimmen. Eine Route  $\pi$  ist zulässig, wenn die Kapazitätsgrenzen des Fahrzeuges  $a$  beachtet werden. Diese kommen durch das maximal zuladbare Auftragsvolumen  $q_{vol}^{max}(a)$ , das zulässige Höchstgewicht eines Fahrzeuges  $q_w^{max}(a)$ , sowie die zulässige maximale Fahrdauer pro Tag  $t^{max}$  zum Ausdruck. Darüberhinaus muss die Tour so geplant werden, dass die Liefertermine  $\tau(r)$ ,  $r \in X$  eingehalten werden können.

Das Tripel  $tour = (X_t, a, \pi)$ , mit  $X_t \subset R_t^{own}$ ,  $a \in A$  sowie einer Route  $\pi$  wird als Tour bezeichnet. Eine Tour  $tour$  ist zulässig, falls  $z(o_a, o_r) = true$  für alle Aufträge  $r \in X_t$  und die Route  $\pi_{tour}$  zulässig ist. Die Menge  $T_t$  zulässiger Touren mit  $\bigcup_{tour \in T} X_t(tour) = R_t^{own}$  und  $\bigcap_{tour \in T} X_t(tour) = \emptyset$  heißt Tourenplan zur Menge  $R_t^{own}$ .

- Aus der Zuordnung eines Auftrags  $r$  zu einem Fahrzeug  $a$  ergibt sich für alle Aufträge, für die  $v^o(r) \neq v^u(a)$  gilt (Fälle c,d,e in Abb. 1), zwangsläufig die Notwendigkeit, einen Fremdtransport für die Beförderung vom Unternehmensstandort  $v^o(r)$  zum Umschlagpunkt  $v^u(a)$  zu planen. Die Menge dieser Aufträge sei  $R_t^{ind}$ . Die verbleibenden, für die Auslieferung mit eigenen Fahrzeugen bestimmten Aufträge  $R_t^{dir} = R_t^{own} \setminus R_t^{ind}$  können direkt vom Unternehmensstandort des Auftragnehmers befördert werden (Fall a in Abb. 1).

Alle Aufträge  $Y \subset R_t^{ind}$  mit übereinstimmendem Bereitstellungsort  $v^o$ , die für dasselbe Abhollager  $v^u$  bestimmt sind, werden zu einer Sendung  $s = (v^o, v^u, Y, l(v^u))$  vom Unternehmensstandort  $v^o$  zu dem Umschlagpunkt  $v^u$  mit dem diesem Umschlagpunkt zugeordneten Transportdienstleister  $l(v^u)$  zusammengefasst. Man beachte, dass sich die Menge  $S_t^{ind}$  aller Sendungen zur Menge  $R_t^{ind}$  unmittelbar aus einem gegebenen Tourenplan  $T_t$  ableitet.

- Die Aufträge  $r \in R_t^{sub}$  werden jeweils als Einzelsendungen  $s = (v^o(r), v^d(r), \{r\}, l)$  an einen der Logistikdienstleister  $l \in L$  zur Direktbelie-

ferung vergeben (Fall b in Abb. 1).  $S_t^{dir}$  sei im Weiteren die Menge aller Sendungen aus der Fremdvergabe der Aufträge in  $R_t^{sub}$ .

Ein Tupel  $\lambda = (T_t, S_t)$  stellt eine zulässige Lösung von  $P_t$  dar, sofern  $T_t$  ein zulässiger Tourenplan zur Auftragsmenge  $R_t$  und  $S_t = S_t^{ind} \cup S_t^{dir}$  eine zu  $T_t$  kompatible Menge von Sendungen ist.

Die Kosten einer Lösung  $\lambda = (T_t, S_t)$  setzen sich aus den Gesamtkosten  $C^{own}(T_t)$  für den Einsatz der Kooperationsfahrzeuge und den Kosten  $C^{sub}(S_t)$  für die Fremdvergabe zusammen.

### 3 Ein metaheuristisches Verfahren zur Lösung statischer Teilprobleme

Das vorgestellte RVRP ist NP-schwer. Da die Anzahl der Aufträge aller vier Lieferanten ist zu groß ist, um das Problem optimal zu lösen, wurde zur Bearbeitung eine Metaheuristik gewählt. Das in diesem Artikel vorgestellte Verfahren ist eine Erweiterung des in [PS08] präsentierten Ansatzes, welcher für eine erste Abschätzung des Potentials der vorgestellten Kooperation entwickelt wurde. Durch die Erweiterungen berücksichtigt das Verfahren nun dynamische Aspekte sowie frei wählbare Zeitfenster für die Wunschliefertermine der Kunden. Kern ist die simultane Planung von Eigentransport und Fremdvergabe. Jedes der im vorangehenden Abschnitt beschriebenen temporären Probleme wird in 2 Phasen gelöst. In Phase 1, dem Eröffnungsverfahren, wird mit Hilfe einer einfachen Einfügeheuristik eine erste zulässige Lösung erzeugt. Ausgehend von dieser Ausgangslösung wird in Phase 2 mittels einer Nachbarschaftssuche versucht, eine verbesserte Lösung zu finden.

#### 3.1 Einfügeheuristik (Phase 1)

Vor Anwendung der Einfügeheuristik wird ein Basis-Transportplan angelegt, welcher alle zur Verfügung stehenden Transportmittel in ihrem derzeitigen Ausführungszustand umfasst. Dieser berücksichtigt insbesondere alle irreversiblen Planungsentscheidungen, die bislang getroffen wurden. Aufträge, die seit der letzten Aktualisierung neu eingetroffen sind, werden in zufälliger Reihenfolge in den Plan eingefügt. Dazu wird für jeden Auftrag zunächst die kostengünstigste Einfügevariante in den Touren der eigenen Auslieferungsfahrzeuge bestimmt. Ist eine solche Einplanung möglich, muss anschließend überprüft werden, ob es sich um Auslieferungsfahrzeug in einer der dezentralen Lieferregionen handelt. Falls dies der Fall ist, wird zusätzlich ein Speditionstransport zum jeweiligen Abhollager geplant. Kann ein Auftrag nicht in eine eigene Tour eingeplant werden, wird der komplette Auftrag als fremdvergebener Direkttransport eingeplant.

#### 3.2 Verbesserungsverfahren (Phase 2)

Das heuristische Konzept zur Verbesserung der Ausgangslösung ist eine Variante des sog. Large Neighborhood Search (LNS) [Shaw97]. Als Nachbarschaft werden



hierfür Lösungen bezeichnet, die dadurch entstehen, dass aus der letzten Ausgangslösung ein gewisser Anteil an Aufträgen zufällig aus der letzten betrachteten Lösung entfernt und anschließend in zufälliger Reihenfolge und auf möglichst kostengünstige Weise erneut eingeplant wird (Destruktions-/Rekonstruktionsnachbarschaft). Im Gegensatz zum Konstruktionsverfahren wird bei der Neueinplanung der Aufträge ermittelt, ob die Direktlieferung durch einen Kurierdienst günstiger ist als die Auslieferung durch ein eigenes Fahrzeug einschließlich des Fremdtransports zum Abhollager.

Daraufhin wird geprüft, ob die so entstandene Lösung als neue Ausgangslösung akzeptiert werden kann. Dies ist in Anlehnung an den Threshold Accepting Standard Algorithm [DS90] dann der Fall, wenn die Kosten der betrachteten Nachbarschaftslösung geringer oder nur innerhalb einer vorgegebenen Schranke höher sind als die Kosten der Ausgangslösung. Da auch vorübergehende Verschlechterungen zugelassen werden, kann das vorzeitige Festlaufen der Suche in einem lokalen Minimum vermieden werden. Liegen die Kosten der Nachbarschaftslösung nicht innerhalb der Akzeptanzgrenzen, wird ein erneuter Verbesserungsdurchlauf mit derselben Ausgangslösung gestartet. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis ein vordefiniertes Abbruchkriterium - z.B. eine Zeitschranke, eine bestimmte Anzahl von Iterationen oder das Eintreten eines bestimmten Ereignisses - erfüllt ist.

## 4 Testaufbau und Testergebnisse

### 4.1 Testaufbau

Das Verfahren zur Erzeugung der für den Test verwendeten Test-Problemdaten entspricht weitgehend dem in [PS08] beschriebenen Vorgehen. Es wurden lediglich zwei Erweiterungen vorgenommen, um die dynamischen Aspekte des Problems widerzuspiegeln. Diese sollen hier kurz vorgestellt werden:

- **Eingangszeitpunkt:** Aufgrund fehlender realer Testdaten wurden die Ankunftszeiten der Aufträge normalverteilt mit einer Standardabweichung von  $\sigma = 2$  Stunden und einem Erwartungswert bei 10 Uhr erzeugt. Dies entspricht grob den Erfahrungswerten der Unternehmen, wonach die meisten Aufträge zwischen 8 Uhr und 12 Uhr vormittags eintreffen, einige Aufträge aber auch deutlich früher bzw. später vergeben werden.
- **Fertigstellungszeitpunkt:** Die Unternehmen gaben an, dass die Fertigstellung eines Auftrages in der Regel 20-30 Minuten dauert, so dass für die Dauer der Fertigstellung eine Normalverteilung mit einer Standardabweichung von  $\sigma = 20$  Minuten, einem Erwartungswert von 15 Minuten, und einer Mindestdauer von 10 Minuten als gerechtfertigt erschien.

Analog zur derzeitigen Situation in der Kooperation wurde angenommen, dass nur das Unternehmen mit dem größten eigenen Fuhrpark seine Ressourcen vollständig in den Dienst der gesamten Kooperation stellt. Dieser Zustand wird im Folgenden als „kooperatives Szenario“ bezeichnet.

Die Bestimmung der Gesamt-Transportkosten erfolgte auf der Grundlage der Transportpläne, die für jeden Testdatensatz mit Hilfe der im vorangehenden Abschnitt skizzierten Heuristik ermittelt wurden.

Bezüglich der Fremdvergabe der direkten Haus-zu-Haus-Sendungen wurde vereinfachend unterstellt, dass nur ein Logistkdienstleister mit einem nach Sendungsgewichten gestaffelten Tarif zur Verfügung steht. Die Vorankündigungszeit des Speditors wurde auf 12:30 Uhr angesetzt. Im Zusammenhang mit der Verteilung der Auftragseingänge bedeutet dies, dass nach dieser Zeit noch ca. 10-20% der Aufträge eintreffen.

Zur Erzeugung einer Nachbarschaftslösung wurden in jedem Durchlauf 25 Prozent der in eigene Fahrzeuge und 75 Prozent der in fremdvergebene Direktsendungen verplanten Aufträge aus der Ausgangslösung entfernt. Die hohe Zerstörungsrate der Direktsendungen soll eine unnötige Fremdvergabe verhindern, da so eine laufende Prüfung der Eigentransportmöglichkeit stattfindet.

Die Problemaktualisierung erfolgte alle 10 Minuten. Jeweils nachdem alle neu eingetroffenen Aufträge mittels des Einfügeverfahrens in die neue Ausgangslösung aufgenommen waren, wurden 25 Threshold-Accepting-Iterationen zur Verbesserung des Plans durchgeführt.

## **4.2 Testergebnisse**

Es wurden 20 Testinstanzen mit jeweils insgesamt 185 Aufträgen von 4 Unternehmen erstellt. Da sowohl im Einfüge- als auch im Verbesserungsverfahren zufallsbasierte Berechnungen stattfinden, wurden für jede Instanz 10 Testläufe gestartet. Jeder Testlauf wurde sowohl für das kooperative als auch für das isolierte Szenario durchgeführt. Im isolierten Szenario stehen jedem Kooperationspartner nur die eigenen Fahrzeuge zur Verfügung. Die Ergebnisse der Testläufe sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Im Durchschnitt konnte durch die Kooperation eine Einsparung von 22,8% erreicht werden. Die maximale Einsparung wurde mit 27,8%, die minimale Einsparung mit 16,8% ermittelt.

Zum Vergleich wurden mit denselben Testinstanzen auch Tests unter der Annahme durchgeführt, dass alle Aufträge im Vorhinein bekannt sind und die frühzeitige Voranmeldung bei den Dienstleistern entfällt. Dieses statische Szenario entspricht der in [PS08] zu Grunde gelegten Planungssituation. In diesem Fall wurden insgesamt 5000 Iterationen des Verbesserungsverfahrens durchlaufen. Es zeigte sich, dass die Ergebnisse im statischen Fall im Durchschnitt um 3% besser waren als im dynamischen Szenario. Diese Unterschiede lassen sich durch die im dynamischen Fall frühzeitig zu treffenden irreversiblen Entscheidungen erklären. Allerdings deutet die recht geringe Verschlechterung im dynamischen Szenario auf eine insgesamt starke Wirkung der Synergieeffekte hin, die innerhalb der Kooperation durch die Überschneidungen im Kundenkreis entstehen.

Tabelle 1: Ergebnisse der Testläufe, aggregiert für die einzelnen Instanzen.

Instanz	Mittlere Abweichung von bester gefundener Lösung (in Prozent)		Mittlere durch Kooperation erzielte Einsparung ggü. isoliertem Szenario (in Prozent)
	Kooperatives Szenario	Isoliertes Szenario	
1	1,12	0,30	24,57
2	2,57	0,28	18,96
3	0,71	0,45	22,29
4	1,60	0,27	22,30
5	0,62	0,17	21,32
6	1,70	0,24	24,18
7	2,29	0,18	23,66
8	2,05	1,49	27,83
9	1,66	0,18	24,81
10	1,29	0,27	25,23
11	0,89	0,10	18,94
12	2,19	0,30	24,37
13	0,97	0,29	22,98
14	1,00	0,37	21,01
15	1,02	1,11	24,48
16	1,80	0,29	23,99
17	0,94	0,43	23,05
18	1,53	0,62	24,15
19	1,96	0,29	22,27
20	1,34	0,42	16,78

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorgestellte Algorithmus ist geeignet, ein RVRP zu lösen, welches einen dynamischen Auftragseingang, mehrdimensionale Fahrzeugkapazitäten eines heterogenen Fuhrparks und individuelle Lieferzeitfenster berücksichtigt.

Über die bislang berücksichtigten Problemmerkmale hinaus sind weitere praxisnahe Erweiterungen des entwickelten Verfahrens in Planung.

Darunter fallen beispielsweise die Berücksichtigung von Leergutrückholaufträgen sowie die Möglichkeit, für eigene Fahrzeuge mehrere Touren pro Tag zu planen.

Weiterhin ist die Berücksichtigung zusätzlicher Dynamik-Ursachen geplant, wie tageszeitabhängige Fahrzeiten oder die Einbeziehung unvorhergesehener Verkehrsereignisse (Staus, Fahrzeugausfall). In diesem Zusammenhang sind weitere Überlegungen hinsichtlich der Beschleunigung des Verfahrens notwendig. Dazu zählen neben dem Test anderer metaheuristischer Strategien auch die Einführung vorausschauender Elemente und eine Intensivierung der Nutzung situationsspezifischen Wissens.

## 6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Dietmar Joosten für seine wertvolle Unterstützung bei der Implementierung des vorgestellten Verfahrens.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, und Forschung unter dem Förderkennzeichen 19G7022 A-D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## 7 Literatur

- [DS90] Dueck, G.; Scheuer, T: Threshold Accepting: A general purpose optimization algorithm appearing superior to Simulated Annealing, *Journal of Computational Physics*, 90 (1990), S. 161 -175.
- [PS08] Pankratz, G.; Steinlein, J.: Konsolidierte Disposition von Eigentransport und Fremdvergabe in Distributionskooperationen komplementärer Lieferanten, in: Mönch, L.; Pankratz, G. (Hrsg.): *Intelligente Systeme zur Entscheidungsunterstützung*, SCS Publishing House, San Diego/Erlangen 2008, 163-178.
- [Shaw97] Shaw, P.: A new local search algorithm providing high quality solutions to vehicle routing problems, Technical report, APES group, Department of Computer Sciences, University of Strathclyde, Scotland, 1997.