

Statische Analyse des Optimierungspotenzials einer Nachlieferungssteuerung für Tageszeitungen

Francesco Ferrucci, Stefan Bock

Wirtschaftsinformatik und Operations Research (WINFOR)

Bergische Universität Wuppertal

Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

{fferrucci, sbock}@winfor.de

Abstract

Täglich kommt es vor, dass Tageszeitungsabonnenten ihre Zeitung morgens nicht vorfinden. Da sich derartige Szenarien nicht vollständig vermeiden lassen, besteht für Zeitungsverlage die Möglichkeit, sich durch einen leistungsfähigen Nachlieferservice für Tageszeitungen von ihren Mitbewerbern zu differenzieren. Meist erfolgt die Auftragsdisposition einer derartigen Nachlieferung in der Praxis ohne den Einsatz eines Entscheidungsunterstützungssystems. In dem vorliegenden Praxisszenario führt dies zu teilweise unerwünscht langen Nachlieferzeiten.

Dieser Beitrag evaluiert anhand von realen Praxisdaten, inwiefern sich die Servicequalität der Zeitungsnachlieferung durch den Einsatz einer Nachliefersteuerung in Form einer zentralen Tourenplanung verbessern lässt. Dabei wird die Servicequalität durch die benötigte Nachlieferdauer operationalisiert. Als untergeordnete Zielsetzung soll der variable Ressourcenverbrauch in Form der gewichteten Summe aus Gesamteinsatzzeit der Fahrzeuge und der zurückgelegten Fahrdistanz minimiert werden.

Durch Anwendung eines Lösungsverfahrens mit einer gewichteten, multikriteriellen Zielfunktion und variabler Nachbarschaftssuche wird eine statische Abschätzung des maximal möglichen Optimierungspotenzials ermittelt. Die Evaluationsergebnisse des untersuchten statischen Szenarios zeigen, dass durch den Einsatz einer zentralen Tourenplanung ein erhebliches theoretisches Qualitätsverbesserungspotenzial besteht. So lässt sich eine signifikante Steigerung der Servicequalität bei gleichzeitiger deutlicher Reduzierung des variablen Ressourcenverbrauchs erreichen.

1 Einleitung

Täglich kommt es vor, dass Tageszeitungsabonnenten ihre Zeitung morgens aufgrund eines Zustellerfehlers, eines Zustellerausfalls oder eines Diebstahls nicht vorfinden. Für Zeitungsverlage besteht daher die Möglichkeit, sich durch einen leistungsfähigen Nachlieferservice fehlender Tageszeitungen von ihren Mitbewerbern zu differenzieren.

Die betrachtete Situation beschreibt die morgendliche Nachlieferung verschiedener Tageszeitungen, deren ordnungsgemäße Zustellung in der Nacht zuvor erfolgt. Die Analyse der in der Praxis erzeugten Nachlieferzeiten ergab, dass ein erheblicher Anteil der Nachlieferungen

zu langsam erfolgt, so dass die angestrebte Nachlieferzeit von maximal 60 Minuten (im Folgenden als *Servicezeit* bezeichnet) häufig nicht erreicht wird. Da es sich bei Tageszeitungen um Güter mit besonders hoher Verderblichkeit handelt, ist eine Nachlieferung für den Kunden nur dann von Wert, wenn die benötigte Servicezeit entsprechend gering ist. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Servicequalität der Nachlieferung ausschließlich durch die benötigte maximale Servicezeit operationalisiert. In diesem Beitrag wird der Frage nachgegangen, ob sich die Servicequalität durch eine Nachliefersteuerung verbessern lässt.

Die vorliegende Problemstellung der Zeitungsnachlieferung kann als Tourenplanungsproblem aufgefasst werden. Die zu lösende Aufgabe der Tourenplanung besteht darin, eine Menge von Nachlieferungsaufträgen einer Menge von Transportmitteln (in dem betrachteten Fall PKWs) zuzuweisen. Darüber hinaus ist festzulegen, in welcher Reihenfolge die Nachlieferungsaufträge durch die einzelnen Transportmittel ausgeführt werden sollen. Jedes Transportmittel erhält somit eine *Tour*. Die Menge aller Touren der vorhandenen Transportmittel wird *Tourenplan* genannt. Im Folgenden wird angenommen, dass sich sämtliche Transportmittel vor und nach der Tourenplanausführung an einer zuvor definierten Position, dem so genannten *Depot*, befinden.

Die Tourenplanung kann unter verschiedenen Zielsetzungen durchgeführt werden. Als Beispiele hierfür sind die Minimierung der Gesamteinsatzzeit beziehungsweise Gesamtfahrzeit der Transportmittel oder die Minimierung der Anzahl der eingesetzten Transportmittel zu nennen. Im vorliegenden Fall der Nachlieferung von Tageszeitungen wird eine multikriterielle Zielsetzung verfolgt. So ist primär eine angestrebte Servicezeit für sämtliche Aufträge einzuhalten. Als sekundäre Zielsetzung ist der Einsatz der benötigten variablen Ressourcen in Form der gewichteten Summe aus Gesamteinsatzzeit der Fahrzeuge und der gesamten zurückgelegten Distanz möglichst gering zu halten.

Bezüglich der Gültigkeit der für die Transportplanung verfügbaren *relevanten Informationen* wird zwischen Szenarien *statischer* und *dynamischer* Tourenplanung unterschieden. Statische Tourenplanungsansätze gehen von der Annahme aus, dass sämtliche, für den Prozess der Tourenplanung relevante Informationen bereits *vor* der Ausführung der Tourenplanung zur Verfügung stehen. Dabei sind insbesondere Informationen hinsichtlich der Vollständigkeit der auszuführenden Aufträge relevant. Da eine Veränderung der vorliegenden Daten durch zukünftige Ereignisse bei statischen Tourenplanungen ausgeschlossen ist, beschränkt sich der Einsatz statischer Tourenplanungsverfahren auf die einmalige Berechnung des Tourenplans *vor* der eigentlichen Ausführung der betrachteten Transportprozesse. Eine spätere Anpassung des ermittelten Tourenplanes ist aufgrund der unterstellten Validität der relevanten Informationen nicht notwendig.

Wegen der Unvorhersehbarkeit von auftretenden Nachlieferungsaufträgen ist die betrachtete Problemstellung durch eine hohe Unsicherheit in Hinblick auf die während des Tagesverlaufes zusätzlich auftretenden Aufträge gekennzeichnet. Daher kann nicht davon ausgegangen werden, dass sämtliche relevante Informationen bereits vor der Tourenplanausführung, d.h. zu Beginn des Tages, vorliegen. So wird ein Großteil der Nachlieferungsaufträge erst am Vormittag bekannt (siehe Abbildung 1). Daher ist von einem Einsatz rein statischer Verfahren zur Steuerung der Nachlieferungsprozesse abzusehen. Allerdings erlaubt der Einsatz statischer

Verfahren im Rahmen von Offline-Analysen vergangener Prozessdaten erste wichtige Rückschlüsse auf das bestehende Optimierungspotenzial.

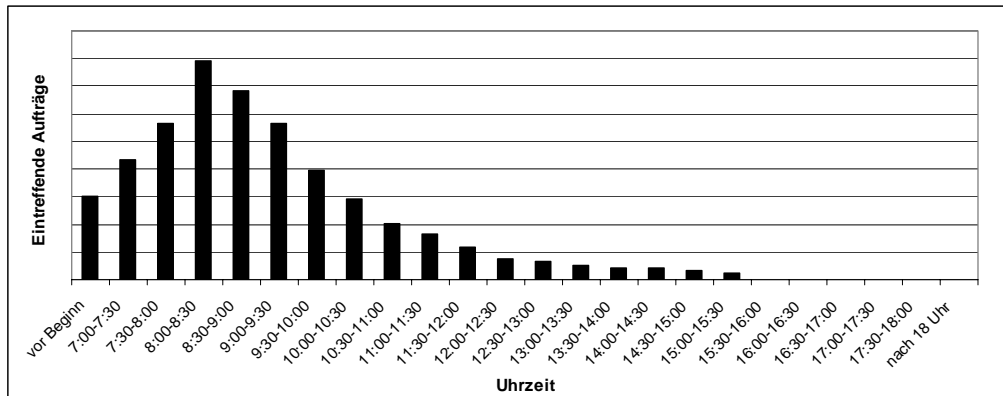


Abbildung 1: Verteilung der Ankunftsrate der Nachlieferaufträge im Tagesverlauf

Dynamische Ansätze zur Tourenplanung lassen sich im Gegensatz zu statischen Tourenplanungsverfahren auch dann einsetzen, wenn lediglich unvollständige Informationen vor Beginn der Ausführung der Transporte vorliegen. Sie sind in der Lage, auf Veränderungen, die erst *während* der Tourenplanausführung auftreten, zu reagieren. Trifft während der Tourenplanausführung eine Veränderung der relevanten Informationen durch das Eintreffen eines *dynamischen Ereignisses* ein, so werden diese Veränderungen durch die dynamische Tourenplanung in das bestehende Szenario integriert. Charakterisierend für die betrachtete Problemstellung ist das dynamische Eintreffen neuer Aufträge, deren Ankunftsrate im Tagesverlauf sehr variiert. So ist der größte Teil der Aufträge gegen 9.00 Uhr morgens bekannt, während bedeutend weniger neue Aufträge in den Nachmittagsstunden eintreffen. Da der Nachlieferprozess jedoch bereits um 7 Uhr beginnt, ist ein Großteil der nachzuliefernden Aufträge als während der Tourenplanausführung eintreffend anzusehen und damit dynamisch.

Trifft während der Tourenplanausführung ein neuer Auftrag ein, ist dieser in die bereits bestehenden und sich in der Ausführung befindenden Touren zu integrieren. Hierbei ist im Gegensatz zu einer statischen Tourenplanung zu berücksichtigen, dass die verschiedenen Transportmittel bereits mit der Ausführung ihrer Tour begonnen haben und sich somit nicht mehr im Depot befinden. Aus diesem Grund ist die Eignung eines Transportmittels für die Zuordnung eines konkreten neuen Auftrages wesentlich von dem derzeitigen Standort des Transportmittels abhängig. Es ist durchaus denkbar, dass sich die angestrebten kürzeren Servicezeiten häufig nur mit Transportmitteln realisieren lassen, die sich zum Zeitpunkt des Eintreffens des neuen Auftrages bereits in der Nähe des neuen Auftrages befinden.

2 Beschreibung der Problemstellung

Besonders motiviert ist die vorliegende Problemstellung für eine dynamische Tourenplanung durch die hohe Verderblichkeit der zu transportierenden Güter. So ist – wie oben beschrieben – eine Nachlieferung nur dann sinnvoll, wenn es gelingt, die Tageszeitung innerhalb kurzer Zeit

nach Auftragseingang, d.h. dem Eintreffen der Information, dass eine Zeitung morgens nicht zugestellt wurde, nachzuliefern.

2.1 Charakterisierung der praktischen Anwendungssituation

Die betrachtete Nachlieferung von Zeitungen entspricht grundsätzlich dem Planen von Auslieferungstouren, die auch innerhalb des Auslieferungsprozesses von Paket- und Brief-Express-Dienstleistern vom Depot zum Empfänger eingesetzt werden. In der betrachteten Anwendungssituation erstreckt sich der Einsatzradius der auszuführenden Nachlieferungen auf das Gebiet einer Großstadt.

In vielen Tourenplanungsanwendungen ist gewünscht, dass Aufträge nur innerhalb bestimmter Zeitfenster bedient werden dürfen. Dies gilt wie beschrieben auch für die betrachtete Problemstellung, bei der die Aufträge möglichst innerhalb der Servicezeit von 60 Minuten nachgeliefert werden sollen. Für die Einhaltung dieser Zeitfenster werden in statischen Tourenplanungsverfahren üblicherweise strikte Zeitfenster, so genannte *hard time windows*, eingesetzt. In dem zugrunde liegenden dynamischen Tourenplanungsszenario kann es aufgrund der sich verändernden Systemsituation vorkommen, dass Aufträge nicht innerhalb der gewünschten Servicezeit ausgeliefert werden können. Dies ist beispielsweise dadurch begründet, dass sich kein Transportmittel in der Nähe des geographischen Ortes des neu hinzugekommenen Auftrages befindet oder sämtliche einsetzbare Transportmittel stark ausgelastet sind. Da die Tourenplanung beim Einsatz harter Zeitfensterrestriktionen in einem derartigen Fall keinen zulässigen Tourenplan mehr generieren kann, muss von einer strikten Servicezeitrestriktion abgesehen werden. Die harten Zeitfenster werden daher in dynamischen Szenarien oft durch so genannte *soft time windows with penalties* ersetzt. Die Verwendung von *soft time windows with penalties* erlaubt die Überschreitung der gewünschten Servicezeit. Allerdings fallen bei einer Überschreitung zusätzliche Kosten in Form von prohibitiven Strafkosten an. Somit lässt sich erreichen, dass auch in der Situation, in der nicht für alle Aufträge die gewünschte Servicezeit eingehalten werden kann, zulässige Tourenpläne ermittelt werden können. Gleichzeitig wird durch die Vorgabe hoher Überschreitungskosten die Anzahl derartiger Überschreitungen möglichst gering gehalten.

2.2 Die betrachtete Aufgabenstellung und Ziel der Untersuchung

Das Problem der Zeitungsnachlieferung kann als dynamisches Vehicle Routing Problem abgebildet werden. Da in der betrachteten Aufgabenstellung als Transportmittel vergleichbare PKWs eingesetzt werden, wird in Hinblick auf die Fahrgeschwindigkeit von homogenen Transportmitteln ausgegangen. Zudem können Kapazitätsrestriktionen der Transportmittel vernachlässigt werden, da die Fahrzeuge am Morgen die nachzuliefernden Zeitungen in ausreichender Stückzahl zu Beginn ihrer Tour im Depot aufladen. Als dynamisches Ereignis wird das Eintreffen neuer Aufträge modelliert. Diese sind, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, möglichst innerhalb der festgelegten Servicezeit nachzuliefern.

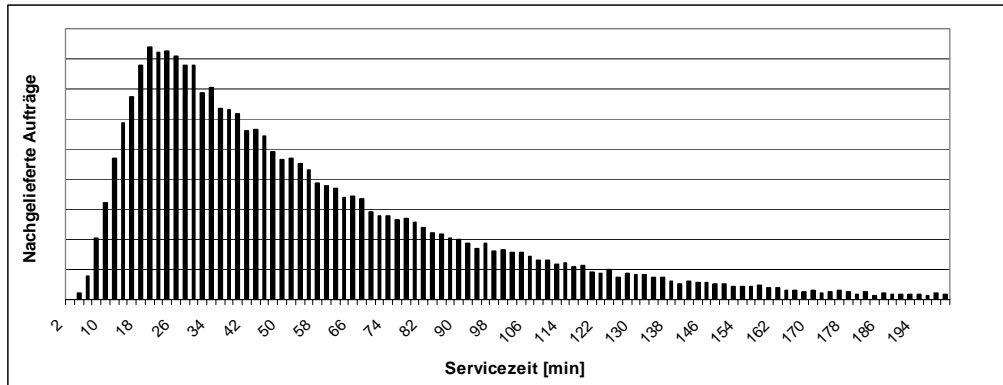


Abbildung 2: Verteilung der benötigten Servicezeiten von Auftragseingang bis Auslieferung

Eine Analyse der bereitgestellten Praxisdaten ergab, dass die momentan nicht zentral durchgeführte Disposition der Nachlieferaufträge dazu führt, dass 25% der Aufträge nicht innerhalb der angestrebten Servicezeit von einer Stunde nach dem Auftragseingang ausgeführt werden. Dabei ist festzustellen, dass es im Einzelfall sogar mehrere Stunden dauern kann, bis eine Nachlieferung abgeschlossen ist (siehe Abbildung 2). Das Ziel der vorliegenden Untersuchung besteht darin, zu evaluieren, ob die gewünschte Servicezeit unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge für sämtliche nachzuliefernden Aufträge erreicht werden kann. Dazu wird die Tourenplanung für neu eintreffende Aufträge zentral durch ein Tourenplanungssystem übernommen.

In diesem Beitrag soll eine erste Abschätzung des Optimierungspotenzials durch eine statische, zentral gesteuerte Tourenplanung durchgeführt werden. Für die statische Evaluation werden die vorliegenden Realdaten in der Art modifiziert, dass die unvollständige Informationslage in eine vollständige Informationslage umgewandelt wird. Somit ist in der vorliegenden Evaluation zu Beginn des Tages und damit vor Beginn der Nachlieferung die gesamte Menge der während des Tages auftretenden Aufträge bereits bekannt. Hierdurch wird die vorliegende dynamische Tourenplanung zu einer statischen Tourenplanung relaxiert, um das maximal mögliche Verbesserungspotenzial zu evaluieren. Hierzu erhält jeder Auftrag einen frühestmöglichen Auslieferzeitpunkt, der seiner realen Ankunftszeit im System entspricht. Unter diesen vereinfachten statischen Voraussetzungen wird angenommen, dass Fahrzeuge bei Kunden von erst später eintreffenden Nachlieferaufträgen warten dürfen, sofern sie den Ort des entsprechenden Nachlieferauftrages bereits vor seinem frühestmöglichen Auslieferzeitpunkt, d.h. seinem realen Ankunftszeitpunkt, erreichen.

Diese Annahme differenziert die in diesem Beitrag untersuchte Situation von der realen, dynamischen Situation, da sie die statische Lösung extrem bevorzugt. Sie repräsentiert somit jedoch eine als *Offline-Szenario* beschreibbare Situation, in der das theoretisch maximal erreichbare Optimierungspotenzial untersucht wird. Motiviert wird dieses Vorgehen dadurch, dass in weiteren folgenden Analysen der Unterschied der in diesem Offline-Szenario erreichten Lösungsqualität als untere Schranke bei der Evaluation der Leistungsfähigkeit weiterer realer, dynamischer Modellierungen verwendet werden kann.

Die gewünschte Länge des Servicezeitfensters wird wie beschrieben durch soft time windows und Strafkosten beim Überschreiten der gewünschten Servicezeit modelliert. Mathematisch ist das Modell des betrachteten statischen Tourenplanungsfalls an das Modell des *Vehicle Routing Problems with soft time windows* (VRPSTW) nach der Beschreibung durch Taillard et al. (1997) angelehnt.

Das Modell ist wie folgt definiert. Gegeben sei ein vollständiger, gerichteter Graph $G = (V, E)$ mit $n+1$ Knoten $v_0..v_n$ und der Pfeilmenge $E = \{(v_i, v_j): v_i, v_j \in V\}$. In diesem Graph repräsentiert der Knoten v_0 das Depot und $v_1..v_n$ die anzufahrenden Orte der Nachlieferaufträge. Jedem Knoten wird ein Zeitfenster $[e_i, l_i]$ für den erlaubten Auslieferungszeitraum und eine Bedienzeit s_i zugewiesen, wobei für jeden Auftrag der Parameter e_i die Ankunftszeit des Auftrages beschreibt. Folglich repräsentiert der Parameter l_i den spätesten erlaubten Auslieferzeitpunkt, der sich direkt aus der Summe von e_i und der gewünschten Servicezeit ergibt. Weiterhin gibt e_0 den Startzeitpunkt und l_0 den spätestmöglichen Endzeitpunkt der Touren aller Fahrzeuge an. Darüber hinaus beschreibt die Fahrzeitenmatrix t_{ij} die benötigte Fahrzeit und die Distanzmatrix d_{ij} die Distanz zwischen den Adressen der Kunden der Aufträge i und j .

Für die Nachlieferung der Aufträge stehen insgesamt m auf ihre Geschwindigkeit bezogene homogene Fahrzeuge zur Verfügung. Zielsetzung ist das Bedienen der Aufträge unter Berücksichtigung der folgenden Restriktionen:

- Jeder Auftrag wird von genau einem Fahrzeug bedient.
- Jedes Fahrzeug beginnt seine Tour zum Zeitpunkt e_0 und beendet sie spätestens zum Zeitpunkt l_0 .
- Jeder Auftrag i wird frühestens zu Beginn seines Zeitfensters $[e_i, l_i]$ nachgeliefert. Erreicht das nachliefernde Fahrzeug den Auftrag i vor Beginn des Zeitfensters zum Zeitpunkt a_i , so entsteht die Wartezeit $w_i = (e_i - a_i)$.
- Beginnt die Nachlieferung von Auftrag i nach dem Ende des erlaubten Zeitfensters, fallen auftragspezifische fixe und variable Verspätungskosten an.

Aus der Menge aller zulässiger Lösungen S soll die Lösung ermittelt werden, die den minimalen Zielfunktionswert $z(s)$ besitzt:

$$z(s) = \sum_{k=1}^m t_k + \alpha \cdot \sum_{k=1}^m d_k + \sum_{i=1}^n (\beta_i \cdot p^{\text{fix}}(a_i - l_i) + \gamma_i \cdot p^{\text{var}}(a_i - l_i)), s \in S$$

Hierbei beschreibt t_k die gesamte Zeit, die Fahrzeug k im Einsatz ist, d.h. die Summe aus Fahr-, Warte- und Bedienzeiten. Die Variable d_k repräsentiert die gesamte Fahrdistanz, die von Fahrzeug k während seiner Tour zurückgelegt wird. Fixe Verspätungskosten werden über die Funktion $p^{\text{fix}}(x) = \Theta(x)$ abgebildet¹. Variable Verspätungskosten sind durch $p^{\text{var}}(x) = \max(0, x)$ definiert. Für Auftrag i werden die fixen Verspätungskosten mit dem Parameter β_i und die von der Verspätungslänge abhängigen Kosten mit dem Parameter γ_i gewichtet.

¹ Die so genannte *Heaviside*-Funktion $\Theta(x)$ ergibt 1 für $x > 0$, 0 sonst.

Der Realitätsgrad des Modells wird dadurch erhöht, dass die Tourenplanung auf Grundlage des realen Straßennetzwerkes des betrachteten Nachliefergebietes durchgeführt wird. Mithilfe des Straßennetzwerkes wird die geographische Lage der Aufträge ermittelt, woraufhin mittels kürzester Wege-Verfahren die Fahrzeitenmatrix t_{ij} und die Distanzmatrix d_{ij} bestimmt wird. Hierbei werden die zeitlich schnellstmöglichen Verbindungen gewählt.

2.3 Literaturüberblick

Aufgrund ihrer hohen praktischen Relevanz ist die Tourenplanung ein in der Literatur sehr häufig betrachtete Problemstellung. Insbesondere zu dem Vehicle Routing Problem (VRP) findet sich eine große Zahl von verschiedenen Lösungsansätzen und Modellvarianten (vgl. für einen Überblick Toth und Vigo (2002)). Da es sich bei dem VRP um eine NP-harte Problemstellung im strengen Sinne handelt, lassen sich Probleminstanzen realistischer Größe meist nur heuristisch lösen. Hierzu wird häufig ein zweistufiger Lösungsprozess aus Konstruktions- und Verbesserungsverfahren angewendet.

Konstruktionsverfahren entwickeln eine erste Lösung in Form eines Tourenplans, indem einzelne Touren entweder sukzessiv (Solomon (1987)) oder aber simultan (Potvin und Rousseau (1993)) generiert werden. Anschließend erfolgt eine Verbesserung der erzeugten Lösung durch Einsatz eines speziellen Verbesserungsverfahrens. Um dabei lokale Optima des Lösungsraums überwinden zu können, haben sich in diesem Zusammenhang vor allem Tabu Search-Verfahren bewährt, die – vergleichbar einem Column Generation-Verfahren – zur Bildung eines Gesamtplanes verschiedene effiziente Touren aus einem bestehenden Pool kombinieren (Schulze und Fahle (1999), Gendreau et al. (1999), Ichoua et al. (2000), Ichoua et al. (2003), Ichoua et al. (2006)). Während Schulze und Fahle (1999) eine Nachbarschaft einsetzen, die in einer Iteration eine Sequenz von Kunden zu einer anderen Tour verschiebt, kommt in den Verfahren von Gendreau et al. (1999), Ichoua et al. (2000), Ichoua et al. (2003) und Ichoua et al. (2006) eine so genannte CROSS-Operation zum stückweisen Austausch von verschieden großen Tourabschnitten zum Einsatz.

Während der weitaus größere Teil der Literaturbeiträge zum VRP Lösungsverfahren für statische Problemvarianten entwickelt, findet sich in vielen Veröffentlichungen jüngerer Datums eine steigende Anzahl dynamischer Ansätze (Gendreau et al. (1998), Gendreau et al. (1999), Larsen (2001), Ichoua et al. (2000), Giaglis et al. (2004), Larsen (2001), Ghiani et al. (2003), Ichoua et al. (2003), Ichoua et al. (2006)). Diese Entwicklung ist durch die steigende Praxisrelevanz dynamischer Problemstellungen zu erklären. So ermöglichen moderne Informationssysteme zur Standortbestimmung und mobilen Datenübertragung erstmals die zentrale Erfassung und Verarbeitung von Positionsdaten mobiler Transportmittel.

Dynamische Tourenplanungsansätze lassen sich anhand verschiedener Kriterien klassifizieren. So finden sich beispielsweise in Psarraftis (1988), Lund et al. (1996), Larsen et al. (2002) oder Ghiani et al. (2003) entsprechende Klassifizierungsschemata. Als charakterisierende Merkmale können zum Beispiel der Umfang der sich dynamisch verändernden Parameter oder die Art der jeweils ausgeführten Plananpassungen verwendet werden.

In Gendreau et al. (1999) findet sich ein echtzeitfähiges Steuerungsverfahren für das VRP, das eine kontinuierliche Anpassung der bereits in der Ausführung befindlichen Tourenpläne erlaubt. Allerdings können Touren erst nach Erreichen des jeweils nächsten Zielortes verändert

werden. Als dynamisches Ereignis wird das Eintreffen neuer Aufträge abgebildet. Dieses Konzept wird in Ichoua et al. (2000) dahingehend erweitert, dass beim Eintreffen neuer Aufträge Fahrzeuge auch auf ihrem Weg zu ihrem aktuellen Auftrag umgeleitet werden können. In der jüngsten Literatur findet sich darüber hinaus eine Reihe von Beiträgen zur Entwicklung robuster Tourenpläne (Ichoua et al. (2006), Hvattum et al. (2006)). So lässt sich häufig die Sensitivität von entwickelten Tourenplänen gegenüber Veränderungen durch eine Integration vorhandener Informationen hinsichtlich der Orts- und Zeitverteilung zukünftiger Aufträge signifikant vermindern.

3 Eingesetztes Lösungsverfahren

Das eingesetzte Lösungsverfahren basiert auf einer Tabu Search-Implementierung von Nanry und Barnes (2000). Dieses Verfahren wurde gewählt, da es sich durch eine hohe Lösungsqualität für das Pickup and Delivery Problem bei vergleichsweise geringer Rechenzeit auszeichnet. Dies ist insbesondere für einen Einsatz unter den engen Zeitrestriktionen einer Echtzeitsteuerung wichtig, da in weiteren Arbeiten das vorgestellte Optimierungsverfahren zu einem dynamischen Tourenplanungsansatz erweitert werden soll.

Die im Tabu Search-Verfahren verwendete Nachbarschaft besteht aus drei verschiedenen Nachbarschaftsoperationen. Sie umfasst sowohl lokale als auch globale Verschiebungen von Aufträgen innerhalb von Touren und zwischen Touren sowie den paarweisen Austausch von Aufträgen zwischen verschiedenen Touren (siehe Abbildung 3).

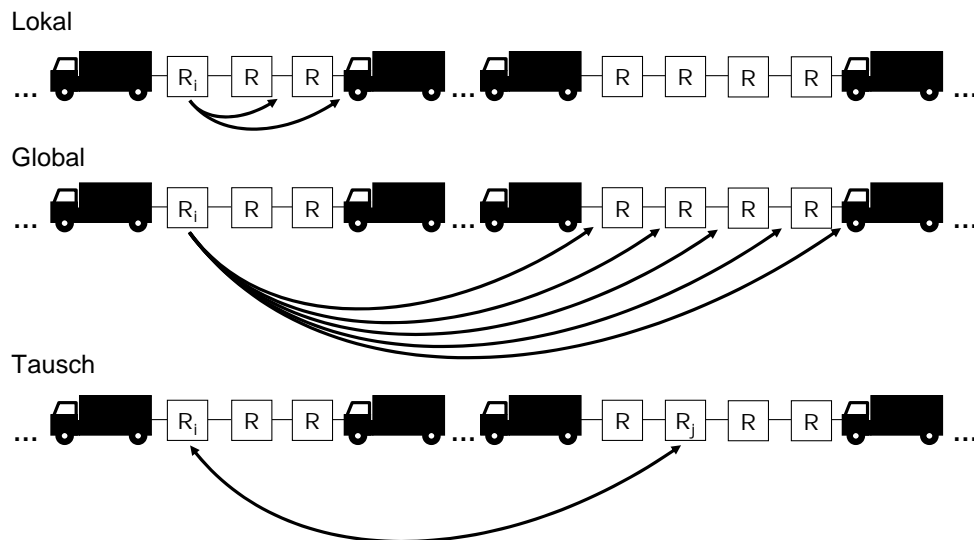


Abbildung 3: Einfügepositionen der lokalen, globalen und Tausch-Nachbarschaftsoperationen

Die lokalen Verschiebeoperationen untersuchen die Neupositionierung des betrachteten Auftrages innerhalb der aktuellen Tour des Fahrzeuges, das derzeit den Auftrag ausliefert. Demgegenüber untersuchen globale Verschiebeoperationen das Verschieben eines Auftrages

an alle möglichen Einfügepositionen der derzeitigen Touren aller verfügbaren Fahrzeuge außer den möglichen Einfügepositionen der Tour des aktuellen Fahrzeuges. Hierdurch wird nach Ausführung der Operation der betrachtete Auftrag durch ein anderes Fahrzeug ausgeführt. Die Tauschoperation evaluiert den paarweisen Austausch zweier Aufträge, die derzeit durch zwei unterschiedliche Fahrzeuge ausgeführt werden.

In Anlehnung an Ferrucci (2006) kommen innerhalb des eingesetzten Tabu Search-Verfahrens verallgemeinerte Versionen der oben dargestellten Nachbarschaftsoperationen zum Einsatz. Hierdurch wird ermöglicht, in einer einzelnen Iteration mehr als einen Auftrag (bzw. mehr als zwei Aufträge bei der Tauschoperation) gleichzeitig zu betrachten. Der jeweiligen Nachbarschaftsoperation entsprechend können mehrere Aufträge simultan verschoben und die Auswirkungen der Verschiebung an verschiedene Einfügepositionen evaluiert werden. Somit wird die Flexibilität der Zuggenerierung innerhalb des Tabu Search-Verfahrens vergrößert.

Die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Aufträge führt in dem Tabu Search-Verfahren zu einer deutlich gesteigerten Komplexität innerhalb der Nachbarschaftsevaluation. Da die Betrachtung aller möglichen Teilmengen von Aufträgen zu zeitaufwändig ist, werden im Falle mehrerer zu evaluierender Aufträge – im Gegensatz zu der Betrachtung eines einzelnen Auftrages – nicht alle möglichen Untermengen von Aufträgen betrachtet. Die zu betrachtenden Aufträge werden stattdessen zufällig oder nach definierten Kriterien ausgewählt. Außerdem ist festzustellen, dass die Reihenfolge, in der die einzelnen Aufträge aus den Touren entnommen und anschließend wieder eingefügt werden, einen erheblichen Einfluss auf den sich ergebenden Zielfunktionswert und somit auf die Lösungsqualität besitzt. Somit ist es empfehlenswert, die verschiedenen Permutationen zu evaluieren.

Eine weitere Reduzierung der für die Nachbarschaftsevaluation benötigten Rechenzeit wird durch eine gezielte Speicherung von Teiltouren während des sukzessiven Einfügens eines Auftrages an den Einfügepositionen der jeweiligen Nachbarschaftsoperation erreicht. Darüber hinaus kommen je nach Nachbarschaftsoperation weitere Instrumente zur Laufzeitreduktionen zum Einsatz.

Beispielsweise lässt sich bei der globalen Verschiebeoperation die Laufzeit durch Vorgabe einer effizienten Permutationsreihenfolge signifikant verringern. In aufeinander folgenden Permutationen wird die Reihenfolge, in der die einzelnen Aufträge eingefügt werden, möglichst wenig verändert, so dass möglichst umfangreiche Teilergebnisse der vorherigen Permutation weiterverwendet werden können. Werden beispielsweise fünf Aufträge betrachtet, wird nach der Permutation (1,2,3,4,5) die Permutation (1,2,3,5,4) evaluiert. Hierdurch müssen nur die Aufträge 4 und 5 aus der generierten Lösung entfernt und wieder eingefügt werden, so dass der Berechnungsaufwand auf das Einfügen von zwei Aufträgen im Vergleich zu einer Neupositionierung aller fünf Aufträge reduziert wird. Weiterhin ist es möglich, nur einen definierten Prozentsatz aller möglichen Permutationen zu evaluieren, um die benötigte Laufzeit – eventuell auf Kosten der Lösungsqualität – weiter zu verringern.

Ein weiteres Beispiel lässt sich an der lokalen Verschiebeoperation aufzeigen. Hierbei können in einer Iteration aufgrund der Unabhängigkeit der einzelnen Fahrzeugtouren mehrere Verschiebeoperationen in jeweils paarweise unterschiedlichen Fahrzeugtouren durchgeführt werden.

Durch das Zusammenwirken der dargestellten Maßnahmen wird es auch innerhalb der engen Zeitrestriktionen einer echtzeitfähigen Steuerung möglich, einen für die Ermittlung empfehlenswerter Lösungen ausreichend großen Teil des Lösungsraums zu durchsuchen.

Das eingesetzte Tabu Search-Verfahren nutzt eine variable Nachbarschaft für die Ausführung der Nachbarschaftsoperationen. Der Einsatz variabler Nachbarschaften wurde ursprünglich von Hansen und Mladenović (2001) für verschiedene Anwendungen vorgeschlagen und validiert. Abhängig vom bisherigen Verlauf der Lösungssuche erfolgt eine Anpassung der angewendeten Nachbarschaftsoperation. Das Tabu Search-Verfahren arbeitet hierbei in mehreren Stufen. Dieses Vorgehen erlaubt den kontrollierten Wechsel zwischen Intensifikations- und Diversifikationsmodi. Die Suche des Verbesserungsverfahrens wird mit einer intensivierenden Nachbarschaft gestartet. Wenn nach einer definierten Anzahl von Iterationen keine Verbesserung gefunden wurde, wird die aktuelle Stufe des Verfahrens gewechselt, wobei in höheren Stufen zunehmend diversifizierende Nachbarschaften eingesetzt werden. Dies wird zum einen durch die verwendete Nachbarschaftsoperation selbst, zum anderen durch die Parameter, mit denen die Nachbarschaftsoperation aufgerufen wird, erreicht. So wird beispielsweise in höheren Stufen die Anzahl der Aufträge, die in einer Iteration simultan betrachtet werden, schrittweise erhöht.

4 Testergebnisse

4.1 Testszenario

Die Verbesserung der Servicequalität steht im Mittelpunkt der vorliegenden Untersuchung. Diese Verbesserung soll durch die Einhaltung der definierten Servicezeit erreicht werden. Hierfür wird für jeden Auftrag eine maximal erlaubte Servicezeit von 60 Minuten nach Auftragseingang festgelegt. Um in der durchgeführten statischen Potenzialanalyse nach Möglichkeit alle Aufträge innerhalb der definierten Servicezeit nachzuliefern und diese Zielsetzung zu priorisieren, werden bei Überschreitung der Servicezeit prohibitive Strafkosten definiert. Für jeden Auftrag i wird der Parameter β_i auf 100000 und der Parameter γ_i auf 0 gesetzt, um feste Zeitfenster zu simulieren. Der Einfluss der relativen Gewichtung der Fahrdistanz im Verhältnis zur Fahrzeit, die mithilfe des Parameters α erfolgt, wird innerhalb der Testergebnisse analysiert. Für den Parameter α werden verschiedene Werte im Bereich von 0 bis 10 evaluiert.

Es werden zufällig ausgewählte Tage der realen Praxisdaten als Instanzen untersucht. In den untersuchten Instanzen beginnen die Nachlieferfahrer ihre Tour morgens um 7 Uhr. Aufträge, die vor 7 Uhr eingehen, werden innerhalb des Nachlieferprozesses wie Aufträge behandelt, die um genau 7 Uhr eintreffen. Wie in der realen Situation werden Nachlieferaufträge bis 16 Uhr angenommen. Die Länge der benötigten Bedienzeit s_i wird für jeden Auftrag auf 60 Sekunden festgelegt. Die Testinstanzen wurden auf einem Pentium M 1.86 GHz mit Sonoma-Chipsatz evaluiert, wobei die Implementierung in der Programmiersprache Delphi vorgenommen wurde. Das beschriebene Lösungsverfahren wurde auf jeder Instanz für 240 Sekunden ausgeführt. Sämtliche Testergebnisse stellen Mittelwerte der untersuchten Instanzen dar.

4.2 Testergebnisse

Abbildung 4 zeigt die aktuelle Verteilung (IST) der benötigten Servicezeiten für die gesamte Menge der Nachlieferaufträge im Vergleich zu dem ermittelten Offline-Szenario, wobei exemplarisch der Parameter α auf den Wert 0,1 gesetzt wurde. Die Abbildung zeigt, dass der statischen Potenzialabschätzung zufolge eine Nachlieferung sämtlicher Aufträge in allen betrachteten Instanzen innerhalb der geforderten 60 Minuten möglich ist. In der aktuellen Situation hingegen benötigen Aufträge in Ausnahmefällen über 230 Minuten.

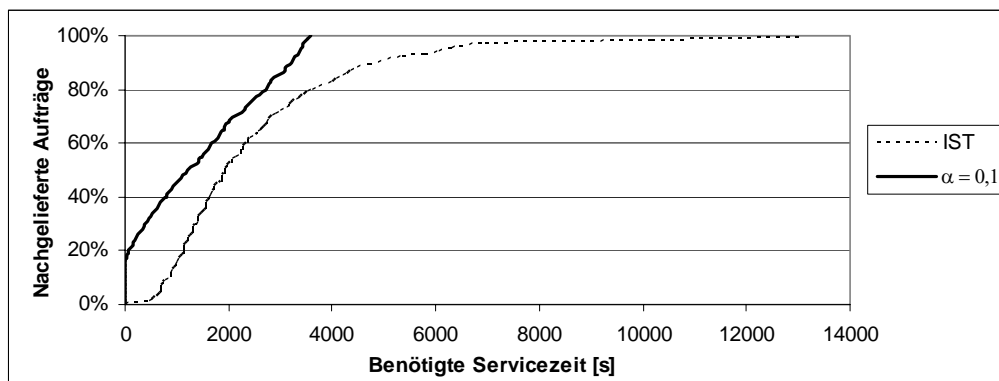


Abbildung 4: Vergleich der erreichten Servicezeit, aktuell und für das Offline-Szenario

Analysen für verschiedene Werte des Parameters α sind in Abbildung 5 und in Abbildung 6 dargestellt. Auffallend ist hierbei, dass sich die durch das eingesetzte Tabu Search-Verfahren generierten Lösungen bereits bei geringeren Variationen des Parameters deutlich unterscheiden. Dies lässt vermuten, dass die Lösungssuche des Tabu Search-Verfahrens sehr sensitiv auf kleine Veränderungen innerhalb der gewählten Zielfunktion reagiert. Somit ist erkennbar, dass das Verfahren eine zielgerichtete Durchsuchung des Lösungsraums erreicht.

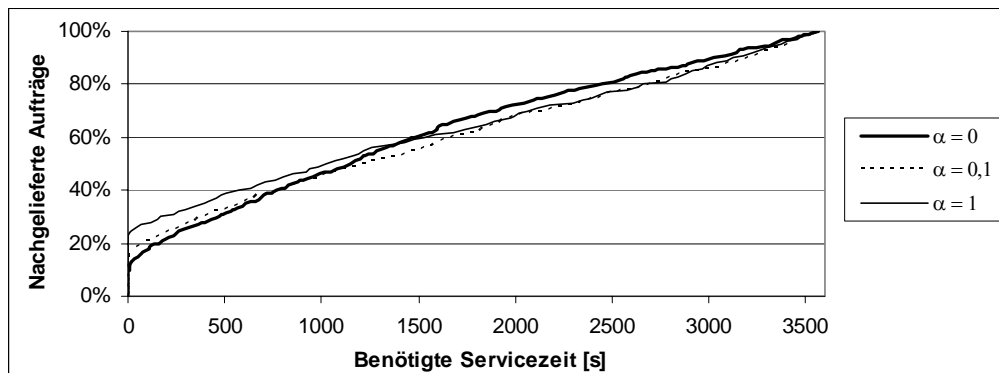


Abbildung 5: Verbesserte kumulierte Servicezeitverteilungen, abhängig von Parameter α

Die Evaluation ergibt, dass ein höher gewählter Wert des Parameters α , d.h. eine höhere Priorisierung der Fahrdistanz gegenüber der Fahrzeit, sich in einem höheren Prozentsatz der im

statischen Szenario direkt bedienten Aufträge niederschlägt. Dies resultiert aus der Tatsache, dass mehr Fahrzeuge eingesetzt werden, um die notwendige Fahrdistanz zu verringern. Hierdurch wird die Anzahl der Fälle erhöht, in denen ein Fahrzeug bei seinem nächsten auszuliefernden Auftrag bereits vor dem frühestmöglichen Auslieferungszeitpunkt ankommt und somit für diesen Auftrag in dem untersuchten Offline-Szenario eine praktisch nicht realisierbare Servicezeit von 0 Sekunden erreicht. In Abbildung 6 lässt sich der erhöhte Fahrzeugeinsatz bei höheren Werten des Parameters α anhand der im Mittel und maximal verwendeten Fahrzeuge erkennen.

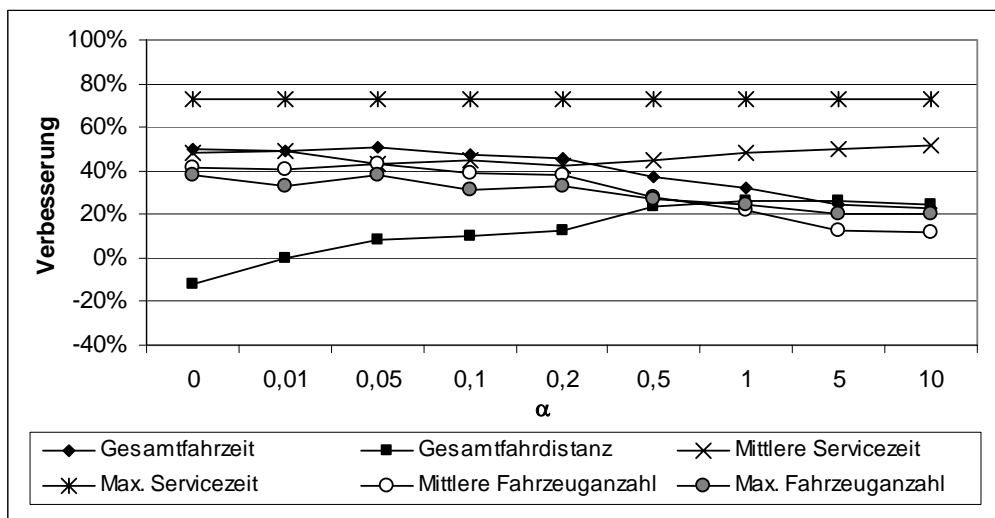


Abbildung 6: Prozentuale Verbesserungen bei verschiedenen Werten für den Parameter α

Die drei Zielgrößen maximal erlaubte Servicezeit, benötigte Gesamteinsatzzeit und benötigte Gesamtdistanz sind miteinander in Konflikt stehende Zielgrößen. Durch die Fixierung der maximal erlaubten Servicezeit auf 60 Minuten lässt sich das Verhalten der beiden restlichen Zielgrößen in Abhängigkeit von Parameter α evaluieren. Erwartungsgemäß verringert sich die benötigte Gesamtdistanz bei Wahl höherer Werte für den Parameter α . Gleichzeitig erhöht sich der gesamte benötigte Zeitbedarf, da hierdurch mehr Fahrzeuge eingesetzt werden. Dies ist dadurch begründet, dass die Gesamteinsatzzeit auch Wartezeiten an Kundenstandorten umfasst. Hierdurch ist es zu erklären, dass bei einer höheren Priorität der Distanz die jeweilige Position der Fahrzeuge bedeutsamer wird.

Die Beschränkung der maximalen Nachlieferdauer auf 60 Minuten stellt eine signifikante Restriktion des möglichen Lösungsraums dar. Dennoch ist zu erkennen, dass ab einem Wert von 0,01 für den Parameter α stets dominante Lösungen erzielt werden. Eine Lösung wird dabei als dominant bezeichnet, wenn für sämtliche untersuchte Zielgrößen mindestens ebenso gute Werte und für mindestens eine Zielgröße ein besserer Wert erzielt werden kann als in der ursprünglichen Praxislösung. Neben der Verbesserung der maximalen Servicezeit ist eine durchgehend kontinuierliche Reduzierung der durchschnittlichen Servicezeit um 40% bis 50% zu beobachten.

Die Testergebnisse zeigen, dass für den Nachlieferprozess durch die betrachtete zentrale Tourenplanung zumindest im Fall des evaluierten Offline-Szenarios ein erhebliches Optimierungspotenzial erreicht werden kann. Auch bei vollständiger Einhaltung der geforderten Servicezeit für jeden Auftrag ist weiterhin eine deutliche Einsparung bezüglich des variablen Ressourcenverbrauches möglich.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Verfahren für die zentrale Tourenplanung von Tageszeitungen vorgestellt. Besondere Motivation besitzt die betrachtete Problemstellung durch die Tatsache, dass in der Praxis bei der Nachlieferung von Tageszeitungen ein hoher Zeitdruck zu berücksichtigen ist. Weiterhin ergab eine Analyse der vorliegenden Praxisdaten des Anwendungsfalls, dass die durch die hohe Verderblichkeit der Zeitungen erwünschten kurzen Servicezeiten häufig deutlich überschritten werden. Der entwickelte Ansatz berücksichtigt die angestrebten kurzen Servicezeiten durch Zeitfensterrestriktionen mit prohibitiven Strafkosten.

Es wurde eine Potenzialabschätzung durch eine zentrale statische Tourenplanung realisiert, die im Rahmen einer Offline-Betrachtung Kenntnis über die zukünftig eintreffenden dynamischen Ereignisse besitzt. Somit repräsentiert der untersuchte Fall ein rein theoretisches Szenario, welches das maximal mögliche Verbesserungspotenzial dynamischer Verfahrensvarianten abschätzt. Die Testergebnisse der Potenzialabschätzung ergeben, dass es im statischen Fall mit den verfügbaren Ressourcen möglich ist, eine maximale Servicezeit von 60 Minuten für sämtliche Aufträge zu erreichen, wobei die resultierenden Lösungen hinsichtlich sämtlicher untersuchten Zielgrößen gegenüber der aktuellen Praxislösung dominant sind.

Aufbauend auf dieser rein statischen Potenzialabschätzung ergeben sich weitere Forschungsvorhaben. Die durchgeführte statische Tourenplanung soll in einem nächsten Schritt dynamisiert werden. Mithilfe einer Simulation sollen Nachliefererszenarien nachgebildet werden, um die erreichbare Nachlieferdauer in realen Szenarien, in denen die nachzuliefernden Aufträge erst während der Tourenplanausführung auftreten, zu evaluieren. Dabei soll die dynamische Tourenplanung unter Verwendung des Echtzeitsteuerungskonzeptes von Bock (2004) implementiert werden.

Weiterhin ist in Hinblick auf einen effizienten und robusten Fahrzeugeinsatz die Integration spezieller stochastischer Modelle und Bewertungsfunktionen zu evaluieren. Zu diesem Zweck sollen beispielsweise die in Ichoua et al. (2006) oder in Hvattum et al. (2006) entwickelten Ansätze untersucht und problembezogen erweitert werden. Weiterhin soll evaluiert werden, welchen Zusatznutzen die Möglichkeit einer kurzfristigen Umlenkung von Fahrzeugen auf dem Weg zu ihrem jeweils nächsten Kunden eröffnet.

Aus Praxissicht ist weiterhin zu beachten, dass zur Nutzung von Nachliefersteuerungssystemen häufig erhebliche Investitionen für komplexere Telematiksysteme notwendig werden. Innerhalb des zu entwickelnden dynamischen Ansatzes sollen dabei Elemente eines wie in Zeimpekis et al. (2005) beschriebenen GPS-gestützten Telematiksystems verwendet werden. Weiterhin sind Anbindungsmöglichkeiten des Nachliefersteuerungssystems an bestehende IT-Systeme zu untersuchen.

6 Danksagung

Die Autoren möchten sich bei der DDS Digital Data Services GmbH, Karlsruhe, für die freundliche Bereitstellung der verwendeten Straßendaten bedanken.

7 Literatur

- Bock, S. (2004). *Echtzeitfähige Steuerung von Speditionsnetzwerken*. Deutscher Universitätsverlag.
- Ferrucci, F. (2006). *Entwicklung und Validierung einer echtzeitfähigen Steuerung für realitätsnahe Pickup-and-Delivery Probleme*. Diplomarbeit an der Universität Paderborn.
- Gendreau, M.; Guertin, F.; Potvin, J.-Y.; Taillard, E. (1999). Parallel Tabu Search for Real-Time Vehicle Routing and Dispatching. In: *Transportation Science* 33, S. 381-390.
- Gendreau, M.; Potvin, J.-Y. (1998). Dynamic Vehicle Routing and Dispatching. In: Crainic, T.G., Laporte, G. (eds.). *Fleet management and logistics*. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, S. 115-126.
- Ghiani, G.; Guerriero, F.; Laporte, G.; Musmanno, R. (2003). Real-time vehicle routing: Solution concepts, algorithms and parallel computing strategies. In: *European Journal of Operational Research* 151, S. 1-11.
- Giaglis, G.M.; Minis, I.; Tatarakis, A.; Zempeki, V. (2004). Minimizing logistics risk through real-time vehicle routing and mobile technologies. In: *International Journal of Physical&Logistics Management* 34, S. 749-764.
- Hansen, P.; Mladenović, N. (2001). Variable Neighbourhood Search: Principles and Applications. In: *European Journal of Operational Research* 130, S. 449-467.
- Hvattum, L.M.; Løkketangen, A.; Laporte, G. (2006). Solving a dynamic and stochastic Vehicle Routing Problem with a Sample Scenario Hedging Heuristic. In: *Transportation Science* 40, S. 421-438.
- Ichoua, S.; Gendreau, M.; Potvin, J.-Y. (2000). Diversion Issues in Real-Time Vehicle Dispatching. In: *Transportation Science* 34, S. 426-438.
- Ichoua, S.; Gendreau, M.; Potvin, J.-Y. (2003). Vehicle dispatching with time-dependent travel times. In: *European Journal of Operational Research* 144, S. 379-396.
- Ichoua, S.; Gendreau, M.; Potvin, J.-Y. (2006). Exploiting Knowledge About Future Demands for Real-Time Vehicle Dispatching. In: *Transportation Science* 40, S. 211-225.
- Larsen, A. (2001). *The Dynamic Vehicle Routing Problem*, PhD-thesis, Technical University of Denmark (DTU).
- Larsen, A.; Madsen, M.; Solomon, M.M. (2002). Partially Dynamic Vehicle Routing – Models and Algorithms. In: *Journal of the Operational Research Society* 53, S. 638-646.

- Lund, K.; Madsen, O.B.G.; Rygaard, J.M. (1996). Vehicle routing problems with varying degrees of dynamism. Technical report, Institute of Mathematical Modelling. Technical University of Denmark.
- Nanry, W.P.; Barnes, J.W. (2000). Solving the pickup and delivery problem with time windows using reactive tabu search. In: *Transportation Research Part B*, S. 107-121.
- Potvin, J.Y.; Rousseau, J.M. (1993). A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows. In: *European Journal of Operational Research*, 66, S. 331-340.
- Psaraftis, H.N. (1988). Dynamic vehicle routing problems. In Golden, B.L.; Assad, A.A. (eds.). *Vehicle Routing: Methods and Studies*. Elsevier, North-Holland, S. 223-248.
- Schulze, J.; Fahle, T. (1999). A Parallel Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Window Constraints. In Basley, J.E.; Sharoiha, Y.M. (eds.): *Combinatorial Optimization: Recent Advances in Theory and Practice*. Baltzer, Special Volume of *Annals of Operations Research*, 86, S. 585-607.
- Solomon, M.M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. In: *Operations Research* 35. S. 254-265.
- Tailard, E.; Badeau, P.; Gendreau, M.; Guertin, F.; Potvin, J.-Y. (1997). A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows. In: *Transportation Science* 31, S. 170-186.
- Toth, P.; Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem*. In: *SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications*.
- Zeimpekis, V.; Giaglis, G.M. (2005). A Dynamic Real-Time Vehicle Routing System for Distribution Operations. In: *Consumer Driven Electronic Transformation*, S. 23-37.