

Autonome operative Transportplanung unter Berücksichtigung von taktischen Qualitätszielen

Jörn Schönberger & Herbert Kopfer
Lehrstuhl für Logistik, FB Wirtschaftswissenschaften, Universität Bremen

Zusammenfassung

Unsichere und unvollständige Planungsdaten erschweren die Disposition von Ressourcen in Logistiksystemen und bedingen eine Iteration der aufgestellten Pläne. Bisherige Ansätze zur reaktiven Anpassung und Überarbeitung von Dispositionsentscheidungen können die widersprüchlichen Zielsetzungen zwischen kurzfristiger Effizienz-Maximierung und mittelfristiger Service-Niveau-Sicherstellung nur unzureichend integrieren. Insbesondere in Situationen mit unvorhergesehenen Lastspitzen ist die Berücksichtigung des aktuellen Zustands des Logistiksystems zur Sicherstellung der langfristigen Überlebensfähigkeit bisher kaum in die Literatur zur Transportplanung eingegangen. Wir stellen in diesem Artikel eine Ergänzung der Methode der Online-Optimierung vor, die es ermöglicht, den aktuellen Systemzustand unter besonderer Berücksichtigung mittelfristig-taktischer Zielsetzungen bei der kurzfristigen Entscheidungsfindung symbiotisch zu berücksichtigen. Die vorgeschlagene Methoden-Erweiterung wird in mehreren Computersimulationen positiv evaluiert.

1. Einleitung

Das Paradigma einer Prozessplanung unter Berücksichtigung vollständiger und sicherer Planungsdaten kann nicht mehr akzeptiert werden. Der rasante Fortschritt bei der Entwicklung sowie die Kostenreduzierung in diesem Bereich und bei der rechnergestützten Transport- und Einsatzplanung führen zu einer zeitnahen Erzeugung relevanter Planungsdaten, die der Einsatzplanung zur Verfügung stehen. Die in den letzten Dekaden durch die Wissenschaft entwickelten Planungsmodelle sind für die Verarbeitung und Berücksichtigung dieser Daten jedoch nur sehr eingeschränkt verwendbar, da sie insbesondere nicht die Flexibilität und Robustheit besitzen, um an plötzlich veränderte Ausgangssituationen angepasst zu werden. Insbesondere können sie sich nicht selbst an diese neuen Situationen anpassen, so dass eine kontinuierliche Interaktion mit einem menschlichen Planer zur Adaption notwendig bleibt.

Wir möchten in diesem Artikel einen Ansatz vorstellen, der es erlaubt, automatische rechnergestützte Dispositionssysteme um die Fähigkeit zur Selbstadaptation an spontane und unvorhersehbare Planungskonstellationen zu ergänzen. Dazu erweitern wir die in der Literatur häufig verwendete Methode der Online-Optimierung (Fiat und Woeginger, 1998) um zwei Komponenten. Einerseits integrieren wir einen Feedback-Mechanismus, der in der Lage ist, signifikante Änderungen der Planungsvoraussetzungen zu erkennen. Andererseits fügen wir der Online-Optimierungs-Methodik eine Komponente hinzu, die die zu lösenden kurzfristigen Entscheidungsproblem-Instanzen für die jeweils festgestellte Planungsvoraussetzung kalibriert und parametrisiert. Dieses erweiterte Online-Optimierungsmodell wird dann zur Steuerung eines Transportsystems aus dem Bereich der Einsatzplanung von Service-Teams verwendet und anschließend in numerischen Simulationsexperimenten evaluiert.

In Abschnitt 2 stellen wir das untersuchte Transportszenario vor. Das zur Steuerung des zugrunde liegenden Logistiksystems verwendete Planungssystem beschreiben wir in Abschnitt 3. Über die Evaluierung dieses Systems berichtet Abschnitt 4.

Das hier vorgestellte Planungssystem wurde im Rahmen des Teilprojekt B7 „Adaptive Fahrzeugeinsatzplanung“ im Sonderforschungsbereich 637 „Selbststeuerung logistischer Prozesse – ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ an der Universität Bremen entwickelt.

2. Transporteinsatzplanung und spontane Lastspitzen

Wir betrachten ein Entscheidungsproblem aus der Transportlogistik mit stochastischen Planungsdaten, bei dem für eine Fahrzeugflotte die Einsatzpläne erstellt und ggf. aufgrund von zusätzlichen Aufträgen überarbeitet werden müssen. Die zusätzlichen Aufträge werden spontan und ohne Vorhersage-Möglichkeit bekannt gegeben, so dass eine reaktive Revidierung und Überarbeitung der Einsatzpläne notwendig ist. Einleitend wird ein kurzer Überblick über die relevante wissenschaftliche Literatur gegeben (Abschnitt 2.1). Dann werden die Rahmenbedingungen für die Erstellung der gewünschten Einsatzpläne sowie die kurzfristig-operativen und mittelfristig-taktischen Zielsetzungen vorgestellt (Abschnitt 2.2). Anschließend präsentieren wir ein Online-Optimierungsmodell für dieses Entscheidungsproblem (Abschnitt 2.3) und beschreiben die Konstruktion von künstlichen Szenarien zur Evaluierung der nachfolgend diskutierten automatischen Planungsverfahren (Abschnitt 2.4).

2.1 Literaturüberblick

Fahrzeug-Einsatzplanungsprobleme mit a-priori unsicheren und unvollständigen Planungsdaten sind in einer Übersicht von Gendreau und Potvin (1998) zusammengefasst. Psaraftis (1988) sowie Psaraftis (1995) diskutieren Unterschiede zwischen Einsatzplan-

Erstellungsproblemen mit vollständig bekannten und teilweise oder komplett unsicheren Planungsdaten.

Unterschiedliche Softwaresysteme und System-Entwürfe zur automatisierten Lösung dieser Planungsprobleme werden von Slater (2002) sowie Gayialis und Tatsiopoulos (2004) vorgeschlagen.

Ghiani et al. (2003), Gendreau et al. (1999), Fleischmann et al. (2004) sowie Gutenschwager et al. (2004) untersuchen Einsatzplan-Erstellungsprobleme, in denen es notwendig ist, Entscheidungen in Echtzeit zu treffen.

Brotcorne et al. (2003) untersucht ein Rettungsdienst-Einsatz-Szenario und entwickelt sowie evaluiert Einsatzplanungs-Strategien und -Werkzeuge.

2.2 Rahmenbedingungen und Ziele der Einsatzplanung

Wir untersuchen das Einsatzplanungsproblem eines Reparatur-Service-Unternehmens, das eine Flotte von Fahrzeugen steuern muss. Jedes Fahrzeug transportiert ein Reparatur-Team sowie die zugehörigen Werkzeuge an den jeweiligen Kunden-Ort und führt dort die notwendigen Instandsetzungsarbeiten durch.

Kunden kontaktieren ein Call-Center zur Abgabe einer Störungsmeldung. Der zugehörige Auftrag wird erfasst und an die Einsatz- & Transportplanung weitergegeben. Die neuen Aufträge werden in die Einsatzpläne integriert und die revidierten Pläne werden den Service-Teams per Mobil-Kommunikationstechnik mitgeteilt.

Für jeden einzelnen Kundenauftrag gibt der Kunde ein Zeitfenster vor, in dem mit den Reparaturarbeiten begonnen werden muss. Diese Vereinbarung erlaubt es einerseits dem Kunden, seine Anwesenheit am Einsatzort des Reparaturteams zu planen. Andererseits wird durch die Vereinbarung eines Besuchstermins die Anzahl der vergeblichen Besuche am Kunden-Ort reduziert.

Einige Aufträge sind zeitkritisch, beispielsweise bei notwendigen Reparaturen von technischen Anlagen in Krankenhäusern oder Sicherheitseinrichtungen (Alarmanlagen, etc.). Diese Aufträge müssen kurzfristig in die bestehenden Pläne integriert und zeitnah ausgeführt werden, so dass die bestehenden Pläne unverzüglich überarbeitet werden müssen. Dabei sind jedoch die vereinbarten Besuchszeitfenster einzuhalten.

Falls es nicht möglich ist, dringende Kundenbesuche in den Einsatzplan eines eigenen Fahrzeug zu integrieren, so können Aufträge für einen vorher bekannten Preis an einen Dienstleistungsunternehmen fremd vergeben werden, der die Verantwortung für die pünktliche und zuverlässige Auftragsausführung gewährleistet.

Ein zentrales Entscheidungsproblem der Einsatz- und Transportplanung besteht nun darin, zu entscheiden, welche Kundenaufträge wie in die Einsatzpläne der eigenen

Fahrzeuge integriert werden, und welche Kundenaufträge an externe Dienstleistungsunternehmen delegiert werden.

Bei der Erstellung der Einsatzpläne sind folgende Zielsetzungen zu berücksichtigen.

- a) Die Kosten für den zu erstellenden Einsatzplan sollen möglichst minimal sein, d.h. es ist eine kosten-minimale Aufteilung des Auftragsbestands in fremd und eigenständig auszuführende Aufträge zu identifizieren. Des Weiteren ist für die eigene Flotte von Service-Crews eine kosten-minimale Touren- und Routenbildung vorzunehmen. Sowohl die Entscheidung über die Fremdvergabe von Aufträgen als auch über die Routenbildung ist nach jeder Änderung des Auftragsbestands zu überprüfen und ggf. zu modifizieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein fremd vergebener Auftrag nicht storniert werden kann.
- b) Es ist eine ausreichend hohe Zuverlässigkeit des Reparatur-Services anzustreben und sicherzustellen. Dabei wird als Maß für die Zuverlässigkeit der Anteil der Aufträge berechnet, die innerhalb des vorgesehenen Zeitfensters mit der Ausführung begonnen werden. Dieses ist bei fremd vergebenen Aufträgen immer sichergestellt. Der Reparatur-Service sichert seinen Kunden zu, p^{target} % aller Aufträge innerhalb der Kundenauftragszeitfenster auszuführen. Dieses Ziel ist genauso wichtig wie die Kosten-Minimierung, da nur eine hohe Service-Zuverlässigkeit die Überlebensfähigkeit der Unternehmung mittel- und langfristig sichern kann.

Die unter a) genannte Zielsetzung der Effizienz-Maximierung ist ein operationales Ziel, das nur die jeweilige Planungssituation bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt. Dem gegenüber ist das unter b) genannte Service- und Qualitätskriterium eine mittelfristige Zielsetzung, die neben der aktuellen Entscheidungssituation auch Entscheidungen aus vorhergehenden Situationen einbezieht und deren Auswirkungen auf zukünftige Entscheidungssituationen berücksichtigt werden müssen.

2.3 Erweitertes Online-Optimierungs-Modell

Da sich die Änderungen der Planungsdaten nicht prognostizieren lassen, können keine Entscheidungsmodelle herangezogen werden, die proaktiv unter Berücksichtigung der Planungsdaten-Unsicherheit Einsatzpläne erstellen. Vielmehr müssen die jeweils gültigen Einsatzpläne reaktiv nach Änderungen überprüft und ggf. angepasst werden. Da bereits die Integration neuer Aufträge in bestehende Einsatzpläne unter Berücksichtigung minimaler Kosten (maximaler Effizienz) ein schwer zu lösendes Optimierungsproblem darstellt, ist es sinnvoll, das o.g. Entscheidungsproblem als eine Sequenz von sukzessiv zu lösenden Optimierungsproblemen P_0, P_1, P_2, \dots darzustellen (Online-Optimierungsproblem).

Das Problem P_i repräsentiert die Aufgabe, aus allen zum Zeitpunkt t_i bekannten Kundenaufträgen einen kostenminimalen Einsatzplan abzuleiten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bereits fremd vergebene Aufträge nicht mehr umdisponiert werden können. Des Weiteren ist sicher zu stellen, dass die Kundenzeitfenster soweit wie möglich respektiert werden.

Bei der Abbildung der Zeitfenster-Bedingung in ein mathematisches Optimierungsproblem verzichten wir auf die Aufstellung einer Restriktion, die gewährleistet, dass 100% aller Besuche innerhalb der Kundenzeitfenster stattfinden. Da wir in der Entscheidungssituation zum Zeitpunkt t_i mit Aufträgen konfrontiert sind, die erst in weiterer Zukunft stattfinden (späte Aufträge) und wir andererseits davon ausgehen, dass bis dahin die aufgestellten Pläne revidiert werden müssen, würde die zum Zeitpunkt t_i erzwungene pünktliche Einplanung aller späten Aufträge die Einsatzplanung für die kurzfristig fälligen Aufträge negativ beeinflussen. Es ist wahrscheinlich, dass für einen isolierten am Rande des Operationsbereichs liegenden späten Kundenauftrag zum Zeitpunkt t_i eine nicht revidierbare, kostenintensive Fremdvergabe festgelegt wird, obwohl bis zum tatsächlichen Fälligkeitstermin für diesen späten Auftrag weitere zeitlich und räumlich kompatible Aufträge erteilt werden könnten, so dass eine Konsolidierung in die Route eines eigenen Fahrzeugs möglich wäre. Aus diesem Grunde wird bei der Disposition zum Zeitpunkt t_i anstelle der erzwungenen pünktlichen Ausführung nur sichergestellt, dass unpünktliche Kundenbesuche mit einem Strafterm in der Zielfunktion berücksichtigt werden. Der Strafterm darf nicht zu hoch angesetzt werden, da ansonsten eine äquivalente Wirkung wie bei der 100%-Restriktion erzielt wird.

Somit beinhaltet die zu P_i gehörende Zielfunktion Z^{kurz} einerseits die Kosten für die eigenen Fahrzeug-Einsätze, dann die Kosten für die Fremdvergabe sowie Strafkosten für zu späte Kundenbesuche. Als Restriktionen werden die Routen-Konstruktionsbedingungen sowie das Verbot der Re-Integration bereits fremd vergebener Aufträge dem Optimierungsproblem P_i hinzugefügt.

Ein plötzlicher signifikanter Anstieg der Anzahl der Aufträge, die eingeplant werden müssen, würde einerseits zu einer Verdichtung der Routen der eigenen Fahrzeuge führen. Andererseits würden viele eilige Aufträge fremd vergeben. Ist der eigene Fuhrpark bereits ausgelastet, so müssen die zusätzlichen Aufträge entweder fremd vergeben werden oder deren Erfüllung muss in die Zukunft verschoben werden, wenn die eigenen Fahrzeuge wieder Kapazitäten frei haben. Da die Fremdvergabe typischerweise sehr kostenintensiv ist, wird diese Option nur bei sehr wichtigen und dringenden Aufträgen gewählt werden. Somit wird ein signifikanter Teil der zusätzlichen Aufträge so eingeplant, dass Zeitfenster verletzt werden, da die „Strafkosten“ niedriger sind als die Fremdvergabe. Konsequenterweise wird die kumulierte Pünktlichkeit, gemessen als Anteil der innerhalb der vereinbarten Zeitfenster begonnenen Kundenbesuche, absinken.

Dies führt zu einer Entfernung vom mittelfristigen Ziel des Unternehmens, nämlich der Sicherstellung einer durchschnittlichen Pünktlichkeit von p^{target} % aller Aufträge.

Um diese negative Auswirkungen dieser Divergenz zu abzumildern oder gar zu verhindern, wird die durchschnittliche Pünktlichkeit innerhalb des Logistiksystems als Repräsentant der Zuverlässigkeit beobachtet. Sobald diese unter den vorgegebenen Zielwert von p % sinkt, werden alle zusätzlich eingelasteten Aufträge fremd vergeben, so dass die eigenen Fahrzeuge die ihnen zugewiesenen Aufträge erledigen können und trotzdem alle zusätzlichen Aufträge pünktlich ausgeführt werden, so dass sich die durchschnittliche Pünktlichkeitsrate nicht verschlechtert und anschließend erholt.

Die erzwungene Fremdvergabe stellt sicher, dass die zusätzlichen Aufträge Last-neutral für das Logistiksystem und dennoch pünktlich erfüllt werden auch wenn die Fremdvergabekosten über den „Strafkosten“ für eine verspätete Einplanung liegen. Des Weiteren ist sichergestellt, dass die zusätzlichen Aufträge nicht immer weiter verschoben werden, denn alle Aufträge aus der Phase mit sehr hoher Zusatzlast werden sofort fremd vergeben und können nicht mehr eigenen Fahrzeugen zugewiesen werden.

Sobald festgestellt wird, dass die Pünktlichkeitsrate p^{target} % wieder erreicht wird, können zukünftige Aufträge wieder in die Routen der eigenen Fahrzeuge eingeplant werden.

2.4 Konstruktion von Test-Szenarien

Online-Szenarien mit Lastspitzen sind in der wissenschaftlichen Literatur zur Einsatzplan-Erstellung in der Transportplanung bisher nicht erwähnt und derzeit nicht Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen. Daher haben wir eine Kollektion von parametrisierten Referenz-Szenarien definiert, in denen über einen Zeitraum von $t^{\text{max}}=5000$ Zeiteinheiten (ZE) alle $\Delta t=100$ ZE $\alpha=50$ zusätzliche neue Kundenaufträge eingelastet werden.

Alle Aufträge werden zufällig aus einer Solomon-Testinstanz P ausgewählt (Solomon, 1988). Dabei wird P als initiale Probleminstanz verwendet. Diese Aufträge sind zum Zeitpunkt $t_0=0$ bereits bekannt. Zum Zeitpunkt $t_1=t_0+\Delta t$ werden zufällig α weitere Aufträge aus P gezogen und eingelastet. Während der Zeit von $t^{\text{peak}}=1500$ ZE bis $t^{\text{peak}}+d^{\text{peak}}$ ZE werden zusätzlich Δ Kundenaufträge eingelastet, so dass in diesem Intervall die Systemeinstastungsrate signifikant über der durchschnittlichen Rate liegt (vgl. Abbildung 1).

Für den Auftrag r , der zum Zeitpunkt $t(r)$ bekannt gegeben wird, wird das Zeitfenster $[t(r) + t_r^{\text{open}}, t(r) + t_r^{\text{close}}]$ festgelegt, wobei $[t_r^{\text{open}}, t_r^{\text{close}}]$ das in P für r hinterlegte Zeitfenster beschreibt.

Jedes Szenario wird somit durch das Triple $(P, d^{\text{peak}}, \Delta)$ identifiziert. Die übrigen Parameter werden festgeschrieben.

3. Autonomes Planungssystem

Im Folgenden beschreiben wir ein Software-System zur Steuerung des im vorherigen Abschnitt beschriebenen Logistiksystems. Neben der automatischen Generierung der Einsatzpläne erfolgt auch das Aktivieren und Deaktivieren der erzwungenen Fremdvergabe automatisch, indem die bisher beobachtete Pünktlichkeit ausgewertet wird. Somit kann eine kontinuierliche autonome Steuerung des Logistiksystems erfolgen, ohne dass ein menschlicher Planer interaktiv in den Planungsprozess eingreifen muss.

In Abschnitt 3.1 beschreiben wir die Komponenten des Planungssystems und deren Interaktionen untereinander sowie mit dem Logistiksystem. Abschließend schlagen wir zwei Verfahren zur Aktivierung und Deaktivierung der zwangsweisen Fremdvergabe vor (Abschnitt 3.2).

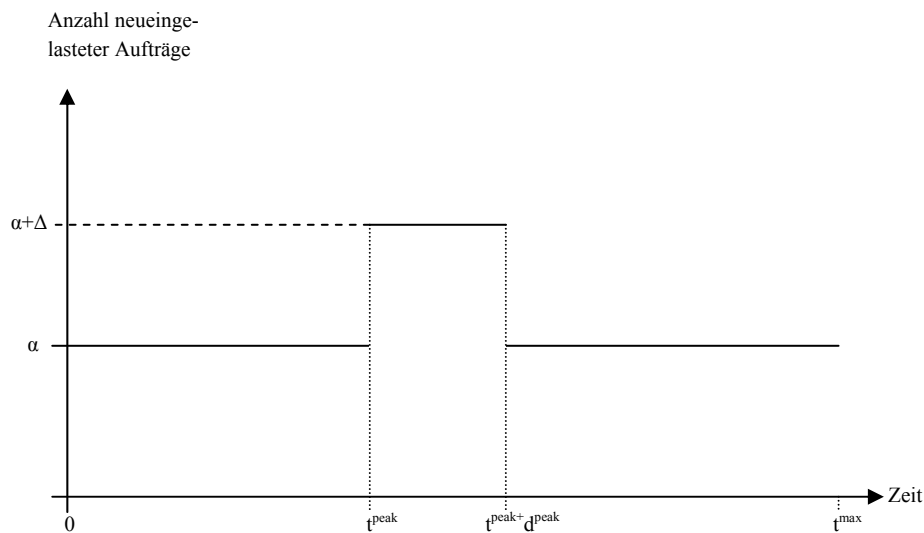


Abbildung 1: In den vorgeschlagenen Testszenarien wird der gleichmäßige Strom neu-eingelasteter Aufträge durch einen zeitlich befristeten Lastanstieg unterbrochen.

3.1 System-Layout

Das Planungssystem besteht aus sechs iterativ sequentiell durchlaufenen Komponenten und vier Schnittstellen zum Logistiksystem, durch die Informationen mit dem Logistiksystem ausgetauscht werden (vgl. Abbildung 2).

In der ersten Komponente werden ankommende neue Aufträge aus dem System entgegen genommen (Schnittstelle A) und in ein internes Datenformat konvertiert. Diese Komponente testet im Abstand von 100 Zeiteinheiten, ob neue Aufträge angekommen sind. Falls ja, so werden diese gebündelt an die nachfolgende Komponente übergeben.

Die zweite Komponente erstellt aus den verfügbaren Planungsdaten ein Modell für das kurzfristige Kostenminimierungsproblem. Über die Schnittstelle B werden die aktuellen Positionen der eigenen Fahrzeuge abgefragt.

Aufgabe der dritten Komponente (Feedback-Interpreter) ist es, zu entscheiden, ob das mittelfristige Serviceziel noch erfüllt ist. Dafür werden zunächst über die Schnittstelle C die Erfüllungszeitpunkte der Aufträge ermittelt. Anschließend wird die aktuell erreichte Pünktlichkeitsrate berechnet. Falls die Pünktlichkeitsrate die vorgegebene Zielrate p^{target} % erfüllt, so wird die fünfte Komponente aufgerufen, andernfalls zunächst die vierte Komponente.

In der vierten Komponente wird allen beim letzten Aufruf der ersten Komponente eingeworbenen Aufträgen das Attribut „fremdzuvergeben“ zugewiesen, so dass diese Aufträge für die Erfüllung mit eigenen Serviceteams gesperrt sind.

Aufgabe der fünften Komponente ist die Erzeugung eines Einsatzplans, in dem beschrieben ist, wie und wann welche Aufträge ausgeführt werden. Zur Ableitung des Einsatzplans aus den Planungsdaten verwenden wir das in Schönberger (2005) entwickelte Framework für Memetische Algorithmen zur Transportplanung. Auf eine Beschreibung des Verfahrens wird hier verzichtet.

Der neue Einsatzplan wird durch die sechste Komponente an die eigenen Service-Teams sowie an die Service-Partner (für die fremd vergebenen Aufträge) weitergegeben. Die Informationsweitergabe erfolgt über die Schnittstelle D.

Nach der Bekanntgabe der neuen Einsatzpläne ist der einmalige Durchlauf des Planungssystems abgeschlossen und eine Instanz des Online-Optimierungsproblems abschließend bearbeitet worden. Zu einem vorher vereinbarten Zeitpunkt erhält die erste Komponente über die Schnittstelle A ggf. Informationen über weitere neue Aufträge, die dann wie oben beschrieben eingeplant werden.

3.2 Steuerung der erzwungenen Fremdvergabe

Die erzwungene Fremdvergabe von Aufträgen bei einem Abfall der System-Zuverlässigkeit stellt die einzige Möglichkeit dar, das Leistungsniveau des Logistiksystems zu erhalten bzw. wiederherzustellen. Somit muss diese Komponente sehr zuverlässig und sensibel gesteuert werden. Wir zeigen im Folgenden, wie die automatische Fremdvergabe aktiviert bzw. deaktiviert wird.

Sei R_t die Menge aller r_t Aufträge, die vor dem Zeitpunkt t in das System eingelastet wurden. Die aus f_t Aufträgen bestehende Teilmenge F_t von R_t umfasst alle vor t fertig gestellten Aufträge. Alle f_t^+ Aufträge, deren Erfüllung innerhalb der vereinbarten Zeitfenster gestartet wurde, sind in der Menge $F_t^+ \subseteq F_t$ gespeichert.

Alle für den Zeitpunkt t oder später zur Ausführung vorgemerkten o_t Aufträge sind in der Menge O_t zusammengefasst. Jeder Auftrag, für den ein Ausführungsbeginn innerhalb des vereinbarten Zeitfensters vorgesehen ist, wird in der Menge O_t^+ gespeichert, die insgesamt o_t^+ Aufträge umfasst.

Die bis zum Zeitpunkt t beobachtete Pünktlichkeitsrate p_t des betrachteten Logistiksystems ist dann definiert durch $p_t = (f_t^+ + o_t^+) / (f_t + o_t)$.

Zum Zeitpunkt t ermittelt die dritte Komponente des Planungssystems zunächst den Wert für p_t . Anschließend wird dieser Wert mit der vorgegebenen Zielrate p^{target} verglichen. Sobald festgestellt wird, dass die beobachtete Rate unter der Zielrate liegt, also $p_t < p^{\text{target}}$ gilt, wird die Fremdvergabe für alle zusätzlichen Aufträge aktiviert und bleibt solange in Kraft, bis sie explizit deaktiviert wird.

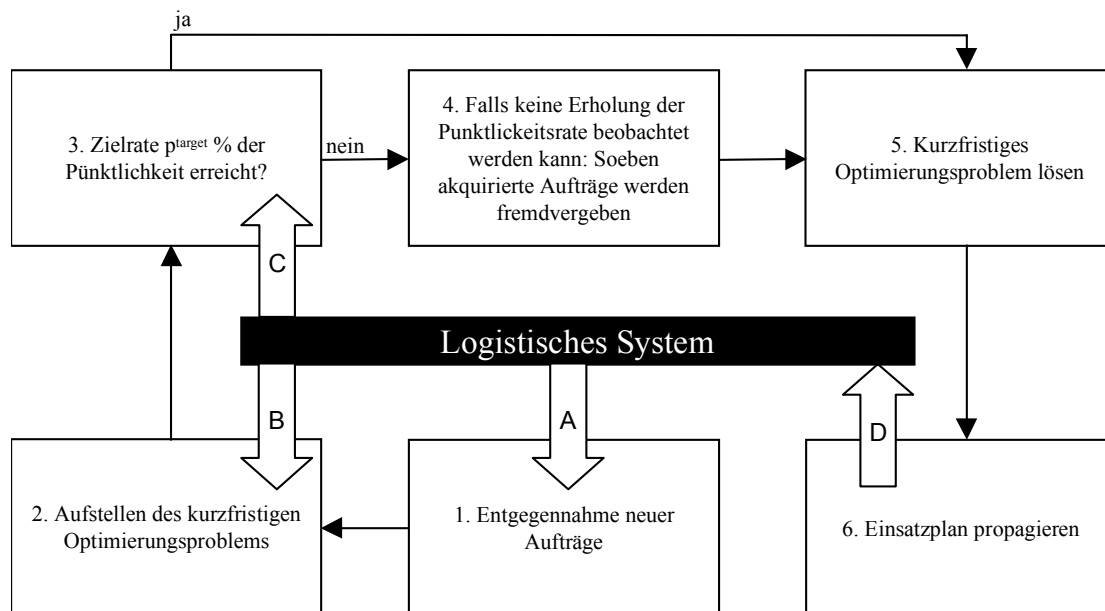


Abbildung 2: Layout des autonomen Planungsagenten

Während einer Phase mit aktivierter Zwangsfremdvergabe werden keine neuen Aufträge in die Einsatzpläne der eigenen Fahrzeuge integriert, so dass diese Ihre Aufträge abarbeiten können. Gleichzeitig stellen die Service-Partner, die die fremd vergebenen Aufträge ausführen eine pünktliche Ausführung der ihnen übertragenen Kundenbesuche sicher. Weitere Aufträge, die in das System eingelastet werden und für die somit eine pünktliche Ausführung sichergestellt ist, führen zur Erhöhung des Anteils p_t der pünktlich fertig gestellten Aufträge, so dass sich die Pünktlichkeitsrate erholt. Sobald sich p_t wieder p^{target} nähert, erkennt dies die vierte Komponente und schaltet die Zwangsfremdvergabe ab.

Eine Erholung der beobachteten Pünktlichkeit kann dadurch gekennzeichnet sein, dass p_t nicht mehr kleiner als p^{target} ist. In diesem Fall wird die Zwangsfremdvergabe erst dann deaktiviert, wenn die Leistung des Logistiksystems wieder die mittelfristig gewünschte Performance aufweist. Aus diesem Grunde bezeichnen wir diese Deaktivierungsstrategie als **Target Fulfilled (TF)**.

Unmittelbar nach Beginn eines signifikanten Lastanstiegs des Logistiksystems zu Beginn eines Auftrags-Peaks fällt die beobachtete Pünktlichkeit ab ggf. unter die Zielpünktlichkeitsrate und die Zwangsfremdvergabe wird aktiviert. Wie oben beschrieben, erholt sich die Pünktlichkeitsrate nach dieser Maßnahme. Aufgrund der Tatsache, dass viele Aufträge erst in weiterer Zukunft final terminiert werden, kann angenommen werden, dass bereits vor dem Erreichen von p^{target} die vor dem Auftrags-Peak beobachtete und wiederherzustellende Performance des Logistiksystems erreicht ist. Somit kann es sinnvoll sein, die Zwangsfremdvergabe bereits vor dem Erreichen von p^{target} zu deaktivieren. In diesem Fall würde die Deaktivierung bereits dann erfolgen, wenn $p_t \geq p_{\text{target}} - \omega$ erreicht ist. Diese Deaktivierungsstrategie bezeichnen wir als **ω -Premature Fulfillment (ω -PF)**. Im folgenden Abschnitt 4 werden beide Deaktivierungsstrategien evaluiert.

4. Computer-Experimente

Zur Verifizierung der generellen Eignung des vorgeschlagenen Software-Systems und zur Erprobung der beiden Deaktivierungsstrategien für die Zwangsfremdvergabe haben wir verschiedene Simulations-Experimente durchgeführt, über die im Folgenden berichtet wird.

In Abschnitt 4.1 beschreiben wir den Versuchsaufbau und in Abschnitt 4.2 beschreiben und interpretieren wir die beobachteten Ergebnisse.

4.1 Konfiguration des Simulationsexperiments

Wir haben unabhängige numerische Simulationen für Szenarien durchgeführt, deren Konstruktion in Abschnitt 2.4 beschrieben ist. Dabei haben wir Szenarien untersucht, die aus den R1-Solomon-Instanzen R103, R104 und R107 konstruiert wurden. Alle 100 ZE werden 50 zusätzliche Aufträge in das System eingelastet.

Die beobachtete Pünktlichkeit liegt immer oberhalb der Zielrate von $p^{\text{target}}=90\%$ und die Selbsteintritts-Quote bei konstant 98%. Bei Anwendung der TF-Deaktivierungsstrategie wird die Zwangsfremdvergabe beendet, sobald wieder eine beobachtete durchschnittliche Pünktlichkeit von 90% erreicht wurde. Experimente wurden ebenfalls mit der ω -PF-Deaktivierungsstrategie durchgeführt, wobei ω auf 5% festgesetzt wurde, also wird die Zwangsfremdvergabe bereits bei einer erreichten Pünktlichkeitsrate von 85% wieder

deaktiviert. Zu Vergleichszwecken wurde jedes Szenario ohne das Zwangsfremdvergabe-Feature simuliert.

In der Zeit von 1500 ZE bis 1700 ZE ($d^{\text{peak}}=200$) werden zusätzlich $\Delta=100$ Aufträge alle 100 ZE in das Logistiksystem eingelastet.

Jedes einzelne der 3 Szenarien wurde mit jeder der drei Aktivierungs-/ Deaktivierungsstrategien in fünf unabhängigen Testläufen simuliert, so dass insgesamt $3 \times 3 \times 5 = 45$ Szenarien nachvollzogen wurden.

4.2 Beschreibung und Interpretation der Simulationsergebnisse

Wir haben die Entwicklung der beiden Parameter p_t (Pünktlichkeit) und den Anteil der im Selbsteintritt durchgeführten Aufträge während der Beobachtungszeit von 0 bis 5000 ZE protokolliert. Dafür haben wir die Durchschnittswerte aus allen Experimentergebnissen berechnet. Im Folgenden beschreiben wir zunächst die Entwicklung der Pünktlichkeit.

Abbildung 3 zeigt diese Entwicklung für alle drei Aktivierungs-/ Deaktivierungsszenarien auf. In allen drei Fällen reduziert sich die Pünktlichkeit unmittelbar nach Beginn des Peaks signifikant auf 76 % (TF sowie ω -PF) bzw. 72% (ohne Zwangsfremdvergabe). In allen drei Fällen erholt sich die Pünktlichkeit, allerdings in unterschiedlichen Zeiträumen und bis zu einem unterschiedlichen Niveau. Ohne Zwangsfremdvergabe wird die Zielpünktlichkeit nicht mehr erreicht, der maximale beobachtete Wert liegt bei 88%. Bei Anwendung der TF-Strategie findet eine Erholung der Pünktlichkeitsrate bis zur Zielpünktlichkeit statt. Zum Zeitpunkt 4000 ist diese erreicht und wird abschließend beibehalten, während die ω -PF-Deaktivierungsstrategie bereits bei ca. 2900 ZE zur Erreichung der Zielpünktlichkeit führt und die Pünktlichkeitsrate 93% erreicht wird.

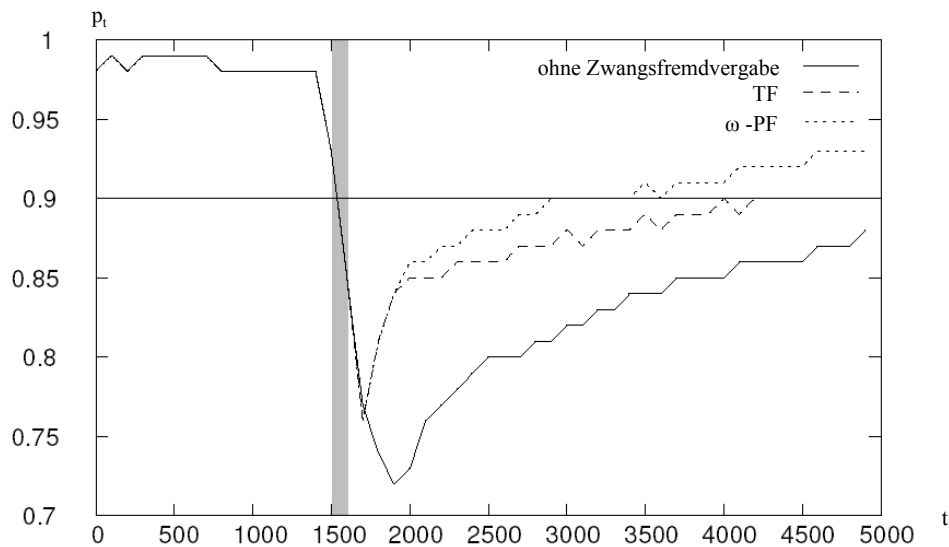


Abbildung 3: Entwicklung der beobachteten durchschnittlichen Pünktlichkeit p_t (Durchschnitt aus allen Experimenten)

In Abbildung 4 ist die Entwicklung des Prozentsatzes der im Selbsteintritt mit eigenen Service-Crews durchgeführten Kundenbesuche dargestellt. Bei allen drei Kurven ist zu erkennen, dass der Selbsteintritt unmittelbar nach Beginn des Auftrags-Peaks signifikant zurückgeht. Am geringsten ist der Rückgang im Fall ohne Zwangsfremdvergabe, hier erfolgt die erhöhte Inanspruchnahme der Service-Partner lediglich aus Kostengründen, da die Fremdvergabekosten geringer als Strafkosten für die Verspätungen sind.

Bei der Anwendung der TF-Deaktivierungsstrategie bricht der Anteil des Selbsteintritts unwiderruflich zusammen und steigt im Beobachtungszeitraum nicht wieder an. Dies kann mit fehlenden Konsolidierungsmöglichkeiten nach Abbau der Lastspitze zum Zeitpunkt von ca. 4000 ZE erklärt werden. Da die Zwangsfremdvergabe erst sehr spät deaktiviert wird, stehen nach deren Deaktivierung nicht mehr ausreichend viele Aufträge zur Verfügung, so dass eine Konsolidierung mehrerer Aufträge in Routen für die eigenen Fahrzeuge ungünstiger ist als die Fremdvergabe.

Dieses Problem wird bei der ω -PF-Deaktivierungsstrategie umgangen, da vorzeitig die Zwangsfremdvergabe deaktiviert wird und somit noch ausreichend Aufträge im Auftragsbestand vorhanden sind, die zu Routen konsolidiert werden können, deren Kosten unterhalb der Fremdvergabe-Kosten liegen. Somit ist die ω -PF-Deaktivierungsstrategie für das betrachtete Unternehmen im Sinne der mittelfristigen Auslastung des eigenen Fuhrparks vorteilhafter.

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsexperimente zeigen einerseits, dass es möglich ist, überlebensfähige Logistiksysteme zu entwerfen, die auch bei extremen Lastspitzen nicht endgültig zusammenbrechen. Dafür ist es aber notwendig, dass die Lastspitzen erkannt und bei den jeweils kurzfristigen Entscheidungen berücksichtigt werden. Das vorgestellte Steuerungssystem leistet sowohl die Erkennung der Lastspitzen und es unterstützt deren Berücksichtigung bei der kurzfristigen Disposition, so dass das Logistiksystem die Peak-Situation übersteht und sich anschließend selbst stabilisiert. Es ist jedoch unbedingt notwendig, das Ergebnis der Peak-Detektoren sehr sorgfältig in die kurzfristige Entscheidungsfindung einzubeziehen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben eine methodische Erweiterung des Grundmodells der Online-Optimierung zur reaktiven Entscheidungsfindung vorgeschlagen und für eine Transport-Anwendung positiv evaluiert. Diese Erweiterung erlaubt es, bei der kurzfristigen Entscheidungsfindung zur Anpassung logistischer Prozesse an veränderte Planungssituationen mittelfristige Zielsetzungen automatisiert zu berücksichtigen. Somit kann durch das vorgestellte erweiterte Online-Optimierungsmodell der methodische Bruch zwischen wiederholter kurzfristiger Entscheidungsfindung und mittelfristigen Zielsetzungen überbrückt werden.

Die nächsten Forschungsschritte werden eine Erweiterung und Verallgemeinerung der vorgestellten Methodik umfassen. Insbesondere werden wir die Zahl der berücksichtigten Leistungsmerkmale zur Beurteilung der Erfüllung der mittelfristigen Zielsetzungen auf zwei oder noch mehr Parameter erhöhen. Des Weiteren werden wir überprüfen, welche Metaheuristiken sich zur Lösung der entstehenden kurzfristigen Dispositionsprobleme am besten eignen.

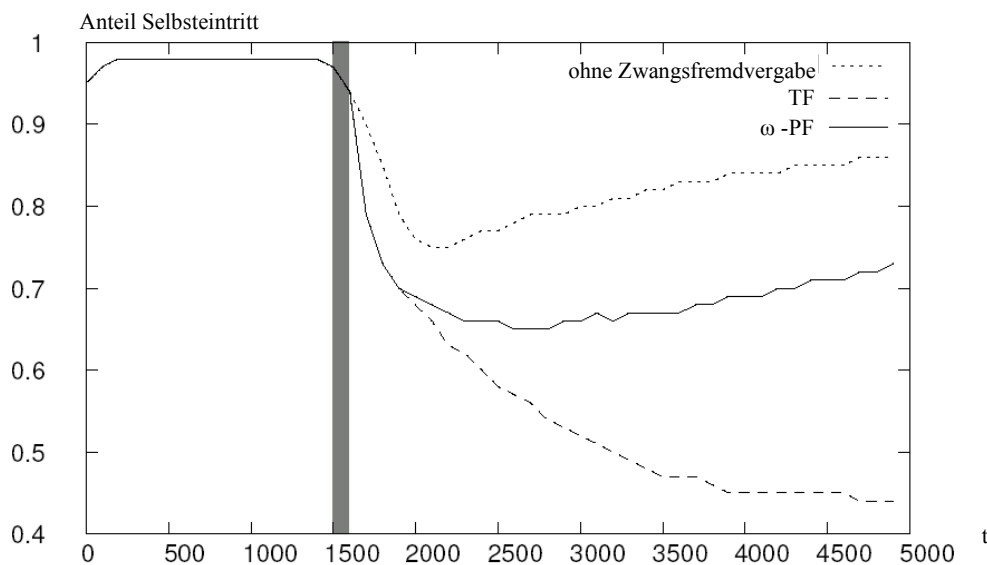


Abbildung 4: Entwicklung des im Selbsteintritt durchgeführten Auftragsbestands.

Literatur

Brotcorne, L., Laporte, G., Semet, F., 2003. Ambulance location and relocation models. *European Journal of Operational Research* 147, pp. 451-463.

Fiat, A., Woeginger, G. (Eds.), 1998. *Online Algorithms: The State of the Art*. Springer.

Fleischmann, B., Gnutzmann, S., Sandvoß, E., 2004. Dynamic vehicle routing based on online traf_c information. *Transportation Science* 38 (4), pp. 420-433.

Gayialis, S., Tatsiopoulos, I., 2004. Design of an it-driven decision support system for vehicle routing and scheduling. *European Journal of Operational Research* 152, pp. 382-298.

Gendreau, M., Potvin, J.-Y., 1998. Dynamic vehicle routing and dispatching. In: Crainic, T., Laporte, G. (Eds.), *Fleet Management and Logistics*. Kluwer, pp. 115-126.

Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J.-Y., Taillard, E., 1999. Parallel tabu search for real-time vehicle routing and dispatching. *Transportation Science* 33 (4), pp. 381-390.

Golden, B., Assad, A. (Eds.), 1988. *Vehicle Routing: Methods and Studies*. North-Holland.

Gutenschwager, K., Niklaus, C., Voß, S., 2004. Dispatching of an electric monorail system: Applying metaheuristics to an online pickup and delivery problem. *Transportation Science* 38 (4), pp. 434-446.

Psaraftis, H., 1988. Dynamic vehicle routing problems. In: Golden and Assad (1988), pp. 223-248.

Psaraftis, H., 1995. Dynamic vehicle routing: status and prospects. *Annals of Operations Research* 61, pp. 143-164.

Schönberger, J., 2005. *Operational Freight Carrier Planning*. Springer.

Slater, A., 2002. Specification for a dynamic vehicle routing and scheduling system. *International Journal of Transport Management* 1, pp. 29-40.

Solomon, M., 1987. The vehicle routing and scheduling problems with some window constraints. *Operations Research* 35 (2), pp. 254-265.