

Adaptive Optimierung: selbststeuernde Anpassung einer operativen Transportkostenoptimierung an strategische Qualitätsziele

Herbert Kopfer & Jörn Schönberger

Lehrstuhl für Logistik, FB Wirtschaftswissenschaft, Universität Bremen

Wilhelm-Herbst-Straße 5, 28359 Bremen, {kopfer,sberger}@logistik.uni-bremen.de

1 Einleitung	1
2 Transporteinsatzplanung bei spontanen Lastspitzen	2
3 Autonomes Planungssystem	7
4 Computer-Experimente	10
5 Zusammenfassung und Ausblick	16
6 Literaturverzeichnis	17

Zusammenfassung

Unsichere und unvollständige Planungsdaten erschweren die Disposition von Ressourcen in Logistiksystemen und bedingen eine Iteration der aufgestellten Pläne. Bisherige methodische Ansätze zur reaktiven Anpassung und Überarbeitung von Dispositionsentscheidungen können widersprüchliche Zielsetzungen nur unzureichend integrieren. Derartige Widersprüche treten zwischen übergeordneten Zielsetzungen eines vernetzten Logistiksystems und den lokalen Zielen autonom agierender Knoten des Logistiksystems auf oder zwischen taktischen Unternehmenszielen und dem Zielsystem einer operativen Planung. So entstehen typischerweise Widersprüche zwischen der kurzfristigen Effizienzmaximierung und der mittelfristigen Service-Niveau-Sicherstellung. 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. Eine Analyse der Kosten zur Abfederung der Lastspitzen mittels verschiedener Dispositionsstrategien beschließt diesen Aufsatz.

1 Einleitung

Der rasante Fortschritt bei der Entwicklung der Telematik 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 je-

doch nur sehr eingeschränkt verwendbar, da sie insbesondere nicht die Flexibilität und Robustheit besitzen, um selbststeuernd an plötzlich veränderte Ausgangssituationen angepasst zu werden. Insbesondere können sie sich nicht selbst an neue 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 mit der Fähigkeit zur Selbstadaption an spontane und unvorhersehbare Planungskonstellationen zu versehen. 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 an der Steuerung eines Transportsystems aus dem Bereich der Einsatzplanung von Service-Teams erprobt und 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 Teilprojekts B7 „Adaptive Fahrzeugeinsatzplanung“ im Sonderforschungsbereich 637 „Selbststeuerung logistischer Prozesse – ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ an der Universität Bremen entwickelt.

2 Transporteinsatzplanung bei spontanen 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 erweitertes 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 solcher Planungsprobleme werden von Slater (2002) sowie Gayialis und Tatsiopoulos (2004) vorgeschlagen.

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

Brotcorne et al. (2003) untersuchen ein Rettungsdienst-Einsatz-Szenario und entwickeln sowie evaluieren 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 das Team 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.

Falls Aufträge zeitkritisch sind, beispielsweise bei notwendigen Reparaturen von technischen Anlagen in Krankenhäusern oder Sicherheitseinrichtungen (Alarmanlagen, etc.), so müssen diese Aufträge kurzfristig in die bestehenden Pläne integriert und zeitnah ausgeführt werden. Dies bedingt eine unverzügliche Überarbeitung der bestehenden Pläne. Dabei sind jedoch die vereinbarten Besuchszeitfenster einzuhalten bzw. zu bewahren.

Falls es nicht möglich ist, dringende Kundenbesuche in den Einsatzplan für die eigenen Fahrzeuge zu integrieren, so können Aufträge für einen vorher bekannten Preis an ein Dienstleistungsunternehmen fremd vergeben werden, das 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. Aufgrund der Kapazitätsbeschränkung des eigenen Fuhrparks ist es unmöglich, dass alle Aufträge fristgemäß unter ausschließlicher Verwendung des eigenen Fuhrparks (bzw. der eigenen Serviceteams) ausgeführt werden.

Um die Pünktlichkeit bei der Ausführung der Aufträge zu erhöhen, ist es daher unerlässlich, dass einige Aufträge fremd vergeben werden. Bei fremd vergebenen Aufträgen ist sichergestellt, dass diese innerhalb des vereinbarten Besuchszeitfensters durchgeführt werden.

Bei der Erstellung der Einsatzpläne sind folgende Zielsetzungen zu berücksichtigen.

- a) Die Kosten für den zu erstellenden Einsatzplan sollen möglichst gering sein, d.h. es ist eine kostenminimale Aufteilung des Auftragsbestands in fremd und eigenständig auszuführende Aufträge zu ermitteln. Des Weiteren ist für die eigene Flotte von Service-Crews eine Kosten minimierende 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 verbogener Auftrag nicht storniert werden kann.
- b) Es ist eine ausreichend hohe Zuverlässigkeit des Reparatur-Services sicherzustellen. Dabei wird als Maß für die Zuverlässigkeit der Anteil λ der Aufträge berechnet, mit deren Ausführung innerhalb des mit dem jeweiligen Kunden vereinbarten Zeitfensters begonnen wird (dieses ist bei fremd vergebenen Aufträgen immer sichergestellt). Der Reparatur-Service sichert seinen Kunden zu, p^{target} % aller Aufträge innerhalb der Kundenauftragszeitfenster am Kundenort zu starten. Damit zum Zeitpunkt t eine möglichst aktuelle Aussage über die durchschnittliche Pünktlichkeit $\lambda(t)$ erfolgen kann, werden nur solche Aufträge bei der Berechnung von $\lambda(t)$ berücksichtigt, die innerhalb der letzten t^- Zeiteinheiten abgeschlossen wurden. Des Weiteren werden von den geplanten zukünftigen Ankunftszeiten nur die in die Berechnung von $\lambda(t)$ einbezogen, die innerhalb der nächsten t^+ Zeiteinheiten liegen, da zu erwarten ist, dass spätere Aufträge noch umgeplant werden.

Das Ziel, die Service-Qualität auf einem konstant hohen Niveau zu halten, ist mittelfristig 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 operatives Ziel, das nur die jeweilige Planungssituation bei der Entscheidungsfindung hinsichtlich der aktuell einzuplanenden Aufträge 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.

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 gül-

tigen Einsatzpläne reaktiv an Änderungen angepasst werden. Da bereits die Integration neuer Aufträge in bestehende Einsatzpläne bei der Zielsetzung minimaler Kosten (maximaler Effizienz) ein schwer zu lösendes Optimierungsproblem darstellt, ist es sinnvoll, das o.a. 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 Planungszeitraums 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 einer Restriktion zur 100%-Einhaltung der Pünktlichkeit erzielt wird.

Somit beinhaltet die zu einer einzigen Planungsinstanz P_i gehörende Zielfunktion $Z^{(i)}$ einerseits die Kosten $C^1(i)$ für die eigenen Fahrzeug-Einsätze, dann die Kosten für die Fremdvergabe $C^2(i)$ sowie Strafkosten $C^3(i)$ für zu späte Kundenbesuche. Die Restriktionen von P_i modellieren die Routen-Konstruktionsbedingungen sowie das Verbot der Re-Integration bereits fremd vergebener Aufträge.

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 zusätzliche 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 Kosten der Fremdvergabe. Konsequenterweise wird die durchschnittliche Pünktlich-

keit $\lambda(t_i)$, 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 $\lambda(t_i) \geq p^{\text{target}} \%$ aller Aufträge im betrachteten Zeitfenster $[t_i - t^-, t_i + t^+]$.

Um diese negative Auswirkungen der Schwankungen des Auftragsaufkommens abzumildern oder gar zu verhindern, wird $\lambda(t)$ als Kennzahl für die Zuverlässigkeit des Logistiksystems beobachtet. Sobald diese unter den vorgegebenen Zielwert von $p^{\text{target}} \%$ sinkt, werden alle zusätzlich eingelasteten Aufträge fremd vergeben. Die eigenen Fahrzeuge können die ihnen zugewiesenen Aufträge erledigen und trotzdem werden alle neu eingelasteten Aufträge pünktlich ausgeführt, so dass sich $\lambda(t)$ tendenziell nicht weiter verschlechtert und anschließend erholt.

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

Die erzwungene Fremdvergabe stellt sicher, dass die zusätzlichen Aufträge Lastneutral 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.

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 zusätzlich $\alpha=50$ neue Kundenaufträge eingelastet werden.

Alle Aufträge werden zufällig aus einer Solomon-Testinstanz P ausgewählt (Solomon, 1988). Dabei werden zufällig 50 Aufträge aus P als initiale Problem Instanz verwendet. Diese Aufträge sind zum Zeitpunkt $t_0=0$ bereits bekannt. Zum Zeitpunkt $t_1=t_0+\Delta t$, $t_2=t_1+\Delta t$, usw. 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 alle Δt ZE weitere Δ Kundenaufträge eingelastet (d.h. der Parameter α wird um Δ erhöht), so dass in diesem Intervall die Systemeinlastungsrate 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.

Alle in P vorgesehenen Fahrzeuge stehen zur Erfüllung der Aufträge zur Verfügung.

Jedes Szenario wird somit durch das Tripel $(P, d^{\text{peak}}, \Delta)$ identifiziert. Für diese Untersuchung haben wir Testinstanzen aus den Solomon-Instanzen R103, R104, R107 und R108 erzeugt. Dabei wurde die Peakdauer d^{peak} auf 200 Zeiteinheiten festgelegt und die Peakhöhe $\Delta=100$ gewählt.

3 Autonomes Planungssystem

Im Folgenden beschreiben wir ein Software-System zur Steuerung des im vorherigen Abschnitt vorgestellten Logistiksystems. Neben der automatischen Generierung der Einsatzpläne erfolgt das Aktivieren und Deaktivieren der erzwungenen Fremdvergabe selbststeuernd, 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. Anschließend schlagen wir zwei Verfahren zur Aktivierung und Deaktivierung der zwangsweisen Fremdvergabe vor (Abschnitt 3.2).

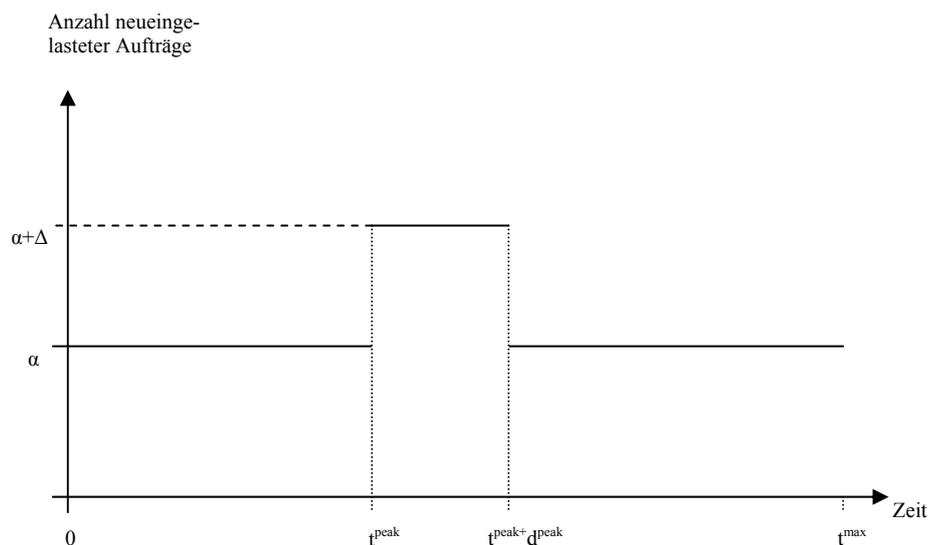


Abbildung 1: In den vorgeschlagenen Testszenarien wird der gleichmäßige Strom neu-eingelasteter Aufträge durch einen zeitlich befristeten Lastanstieg unterbrochen.

3.1 System-Layout

Das Planungssystem besteht aus sechs iterativ sequentiell durchlaufenen Komponenten und vier Schnittstellen zum Logistiksystem (vgl. Abbildung 2).

In der ersten Komponente werden neu ankommende 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 dafür 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 $\lambda(t)$ berechnet. Falls die Pünktlichkeitsrate über der vorgegebenen Zielrate $p^{\text{target}}\%$ liegt, 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 nach der oben beschriebenen Vorgehensweise 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 Serviceniveau des Logistiksystems zu erhalten bzw. wiederherzustellen. Somit muss dieser Mechanismus sehr zuverlässig und sensibel gesteuert werden. Wir beschreiben 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 im Zeitraum $[t-t^-,t]$ fertig gestellten Aufträge. Mit f_t^+ wird die Anzahl aller Aufträge in F_t bezeichnet, deren Erfüllung innerhalb der vereinbarten Zeitfenster pünktlich gestartet wurde.

Alle zur Ausführung im Zeitfenster $[t,t+t^+]$ vorgemerkten o_t Aufträge sind in der Menge O_t zusammengefasst. Diese enthält o_t^+ Aufträge, deren Ausführungsbeginn fristgerecht innerhalb des vereinbarten Zeitfensters vorgesehen ist.

Die bis zum Zeitpunkt t beobachtete Pünktlichkeitsrate $\lambda(t)$ des betrachteten Logistiksystems ist dann definiert durch $\lambda(t) := (f_t^+ + o_t^+) / (f_t + o_t)$. Durch eine Gewichtung der

Summanden f_t^+ und f_t ist es möglich, die Zuverlässigkeit der vergangenen Periode stärker zu berücksichtigen als die der zukünftigen Periode.

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

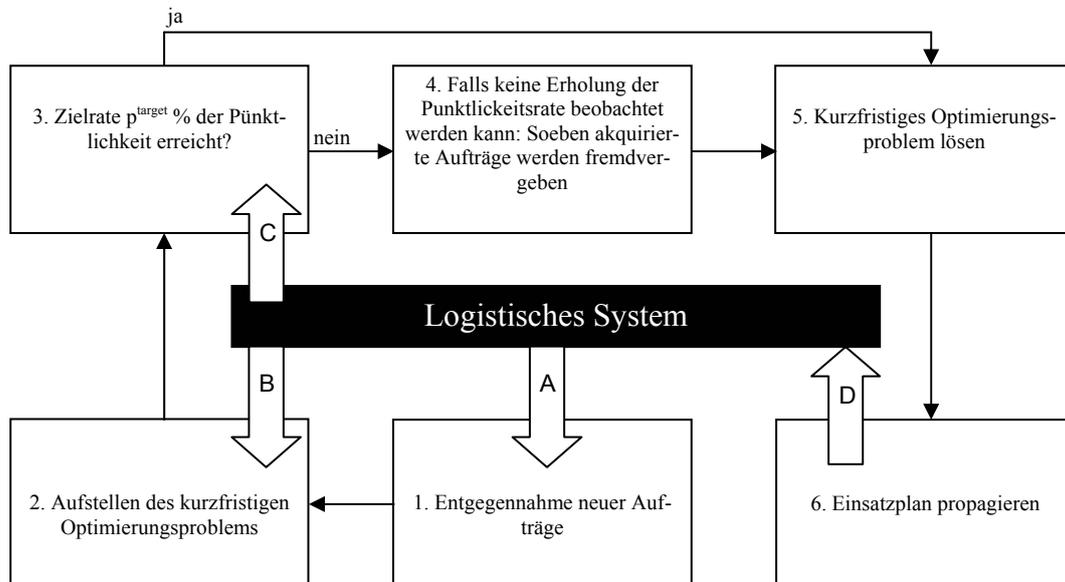


Abbildung 2: Layout des autonomen Planungsagenten

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 $\lambda(t)$ der pünktlich fertig gestellten Aufträge, so dass sich die Pünktlichkeitsrate erholt. Sobald sich $\lambda(t)$ wieder p^{target} nähert, erkennt dies die vierte Komponente und schaltet die Zwangsfremdvergabe ab.

Eine Erholung der beobachteten Pünktlichkeit kann dadurch gekennzeichnet sein, dass $\lambda(t)$ 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 p^{target} aufweist. Wir bezeichnen 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. sogar unter die Zielpünktlichkeitsrate, und die Zwangsfremdvergabe wird aktiviert. Wie oben beschrieben, ist zu erwarten, dass sich die Pünktlichkeitsrate nach dieser Maßnahme erholt. Aufgrund der Tatsache, dass viele Aufträge erst in weiterer Zukunft final termi-

niert 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 $\lambda(t) \geq p^{\text{target}} - \omega$ erreicht ist. Diese Deaktivierungsstrategie bezeichnen wir als **ω -Premature Fulfillment (OP)**.

4 Computer-Experimente

Wir haben zur Evaluierung des autonomen Planungsagenten und zur Bewertung der vorgeschlagenen Interventionsstrategien mehrere Simulationsexperimente durchgeführt, über die im Folgenden berichtet wird.

4.1 Versuchsaufbau

Zunächst wird der zur Ermittlung der Pünktlichkeit $\lambda(t)$ heran gezogene Bereich spezifiziert. Aufgrund verschiedener vorgelagerter Experimente haben wir einen Radius von 500 ZE um den Zeitpunkt t spezifiziert, d.h. $t^- = t^+ = 500$ ZE. Somit werden bei der Berechnung von $\lambda(t)$ alle in den letzten 500 ZE abgeschlossenen Kundenbesuche zusätzlich zu den für die nächsten 500 ZE vorgesehenen Besuchen berücksichtigt.

Es werden Simulationen für drei verschiedene Szenarien durchgeführt. Als Referenz-Szenario betrachten wir einen Planungsagenten, der keine Intervention (NI=no intervention) bei Absinken von $\lambda(t)$ unter p^{target} vorsieht. Zusätzlich simulieren wir je einen Planungsagenten mit TF- und OP-Interventionsstrategie.

Wir verwenden die im Abschnitt 2.4 konstruierten Testszenarien als Datenquelle und simulieren jede der 4 Instanzen jeweils mit der NI-, TF- und OP-Strategie, so dass insgesamt 12 verschiedene Situationen betrachtet werden. Da der verwendete Solver ein randomisiertes Verfahren darstellt, wird jede Situation drei Mal berechnet, so dass insgesamt 36 Simulationsexperimente durchgeführt wurden.

Die Kosten für die Nutzung eines eigenen Fahrzeugs für eine Tour werden auf 1 Geldeinheit (GE) pro Entfernungseinheit festgelegt. Berechnungsgrundlage der Kosten für einen fremd vergebenen Auftrag ist die Luftlinienentfernung vom Depot des Dienstleisters am Ort (65,65) zum jeweiligen Auftragsort. Je Entfernungseinheit werden dem Dienstleistungsunternehmen für den fremd vergebenen Auftrag 1,1 GE gezahlt. Für jeden verspätet, d.h. nach Schließung des vereinbarten Kundenzeitfensters begonnenen Auftrag fallen 25 GE Strafkosten an.

4.2 Numerische Ergebnisse

Für jede der drei Strategien NI, TF und OP wurden die durchschnittlich beobachteten Pünktlichkeitswerte $\lambda(t)^{\text{NI}}$, $\lambda(t)^{\text{TF}}$ und $\lambda(t)^{\text{OP}}$ ermittelt und verglichen. Abbildung 3 beinhaltet die Entwicklung dieser drei Werte über den gesamten betrachteten Zeitraum von 5000 ZE. Vor dem Eintreten des Peaks zum Zeitpunkt 1500 ZE wird eine durchschnittliche Pünktlichkeit von über 90% erreicht, d.h. das Logistiksystem befindet sich in einem gewünschten zulässigen Zustand.

Sobald die Erhöhung der Rate einkommender Aufträge aktiviert ist, fällt die Pünktlichkeit bei allen drei Strategien signifikant ab. Bei Anwendung der NI-Strategie fällt $\lambda^{NI}(t)$ innerhalb von 500 ZE auf unter 35% ab. Anschließend erfolgt eine allmähliche Erholung. Zum Zeitpunkt 2700 ZE ist die notwendige Ziel-Pünktlichkeit von 90% wieder erreicht und wird auch nicht mehr unterschritten. Somit hat die Wiederherstellung des gewünschten Systemzustands 1200 ZE gedauert.

Auch bei der Anwendung der TF-Interventionsstrategie fällt die Pünktlichkeit $\lambda^{TF}(t)$ mit dem Auftreten der Lastspitze zum Zeitpunkt 1500 ZE ab. Der minimal beobachtete Wert liegt jedoch mit 83% deutlich über dem schlechtesten Wert, der bei der NI-Strategie beobachtet wurde. Die Zielquote von 90% erreicht $\lambda^{TF}(t)$ bereits zum Zeitpunkt von 2200 ZE wieder, also 700 ZE nach Auftreten der Lastspitze.

Die für die OP-Strategie beobachteten Ergebnisse sind ähnlich den für die TF-Strategie erzielten Resultaten. Sofort bei Eintritt der Lastspitze fällt $\lambda^{OP}(t)$ deutlich unter die Zielrate von 90% bis auf 80%. Anschließend erfolgt eine Erholung von $\lambda^{OP}(t)$, und die kritische Pünktlichkeitsrate von 90% wird nach 800 ZE zum Zeitpunkt 2300 ZE wieder erreicht.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das betrachtete Logistiksystem in der Lage ist, die außergewöhnliche Belastungsspitze zu überleben. Falls keine Intervention erfolgt, ist die benötigte Rekonvaleszenzzeit wesentlich länger als bei einer Intervention und Anpassung der kurzfristigen Dispositionsregeln. Ohne Intervention ist das Ausmaß des Qualitätseinbruchs hinsichtlich des Serviceniveaus enorm hoch und überschreitet üblicherweise tolerierbare Grenzen.

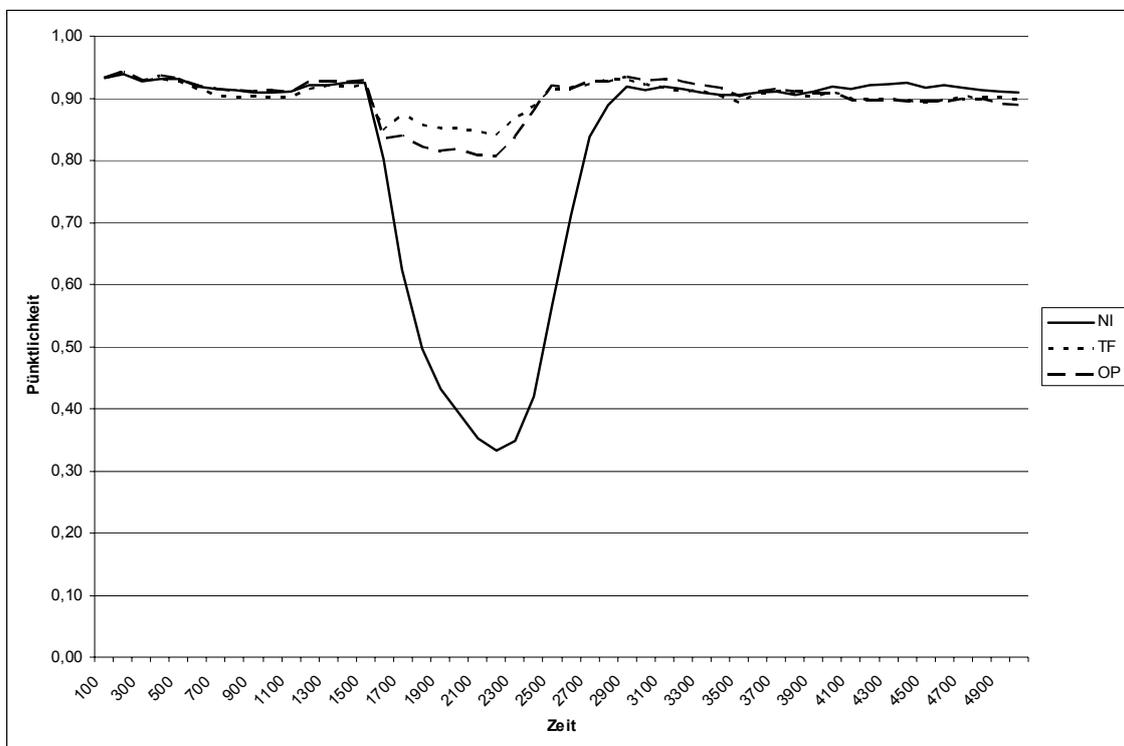


Abbildung 3: Beobachtete durchschnittliche Pünktlichkeiten $\lambda^{NI}(t)$, $\lambda(t)^{TF}$ und $\lambda(t)^{OP}$

Durch die Abweichung von einer ausschließlich kostenorientierten Optimierungsstrategie werden bei Anwendung von TF und OP höhere Kosten erzeugt als bei NI, da während der Aktivierungsphase dieser Interventionsstrategien eine nicht kostenminimale Ressource eingeplant werden muss bzw. zusätzliche Restriktionen berücksichtigt werden müssen. Zur Ermittlung dieser Kosten sind während der Simulation die jeweils bis zum Zeitpunkt t entstandenen Kosten protokolliert worden. Abbildung 4 zeigt die für die einzelnen Strategien durchschnittlich beobachteten kumulierten Kosten $C^{NI}(t)$, $C^{TF}(t)$ und $C^{OP}(t)$.

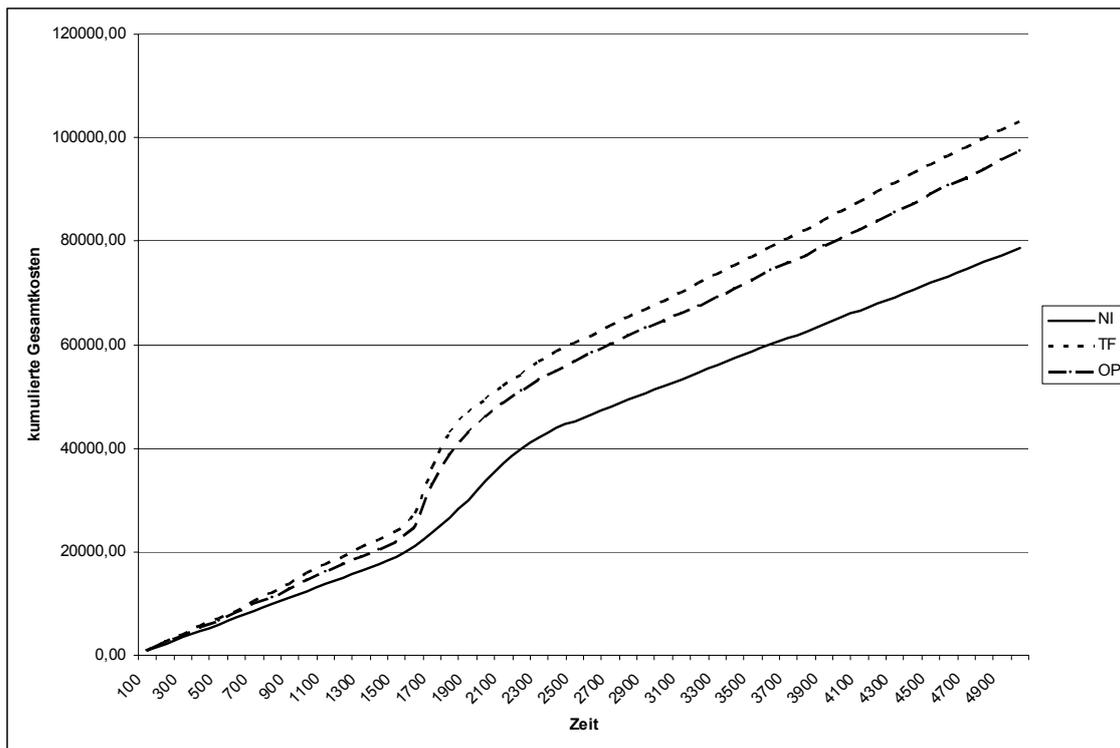


Abbildung 4: Entwicklung der kumulierten Kosten $C^{NI}(t)$, $C^{TF}(t)$ und $C^{OP}(t)$.

Die Testläufe haben ergeben, dass die Kosten bei Anwendung sowohl der TF- als auch der OP-Strategie deutlich über den Kosten liegen, die bei einem Interventionsverzicht entstehen (NI-Strategie). Die Kosten der OP-Strategie liegen unter den Kosten der TF-Strategie. Somit ist festzustellen, dass die Kosten einer Strategie mit ihrer Effektivität (im Sinne der Verhinderung des Abfalls von λ) zunehmen.

Vor Eintritt der Lastspitze sind die Kostenunterschiede vernachlässigbar gering. Sobald jedoch der Peak eintritt, entwickeln sich die Kosten stark unterschiedlich. Bei allen drei Strategien ist ein deutlich überproportionaler Kostenanstieg zu beobachten, dieser ist bei der NI-Strategie am geringsten. Wesentlich stärker ist der überproportionale Kostenanstieg bei den beiden anderen Strategien. Aus diesem Grunde ist der Unterschied der kumulierten Kosten nach Überwindung der Lastspitze zwischen der NI- und der TF- bzw. OP-Strategie wesentlich höher als vor bzw. zu Beginn der Lastspitze. Diese Differenz kann als „Kosten für die Abfederung der Lastspitze“ interpretiert werden. Das Ende der überproportionalen Kostenzunahme und das Wiedererreichen der Zielpunktlichkeit fallen zeitlich zusammen. In diesem Sinne betragen die Kosten für die Anwendung der OP-Strategie ca. $C^{OP}(2300) - C^{NI}(2300) = 52.000 \text{ GE} - 41.000 \text{ GE}$

= 11.000 GE und die Kosten für die Anwendung der TF-Strategie zur Lastabfederung ca. $C^{TF}(2200) - C^{NI}(2200) = 58.000 \text{ GE} - 43.000 \text{ GE} = 15.000 \text{ GE}$.

Bei allen drei Strategien ist ab diesen Zeitpunkten wieder eine lineare Zunahme der kumulierten Kosten zu beobachten. Allerdings steigen die kumulierten Kosten sowohl bei der TF- als auch bei der OP-Strategie wesentlich stärker an als bei der NI-Strategie, so dass der Unterschied zwischen den Kosten für den Einsatz der Interventionsstrategien TF bzw. OP auf ca. 25.000 GE bzw. 18.000 GE ansteigt. Je weiter also die Zeit fortschreitet, desto größer werden die Kostenunterschiede. Obwohl die Auftragsspitze bereits lange abgearbeitet ist, hat sie auch im Nachhinein negative Wirkungen auf die Kostenentwicklung.

Um dieses Phänomen zu erklären, betrachten wir zunächst die Entwicklung der drei Kostenarten C^1 (Selbsteintritt), C^2 (Fremdvergabe) und C^3 (Strafkosten) separat. Auch diese Kosten wurden jeweils bis zum Zeitpunkt t aufsummiert und anschließend wurden je Strategie die durchschnittlichen Werte berechnet.

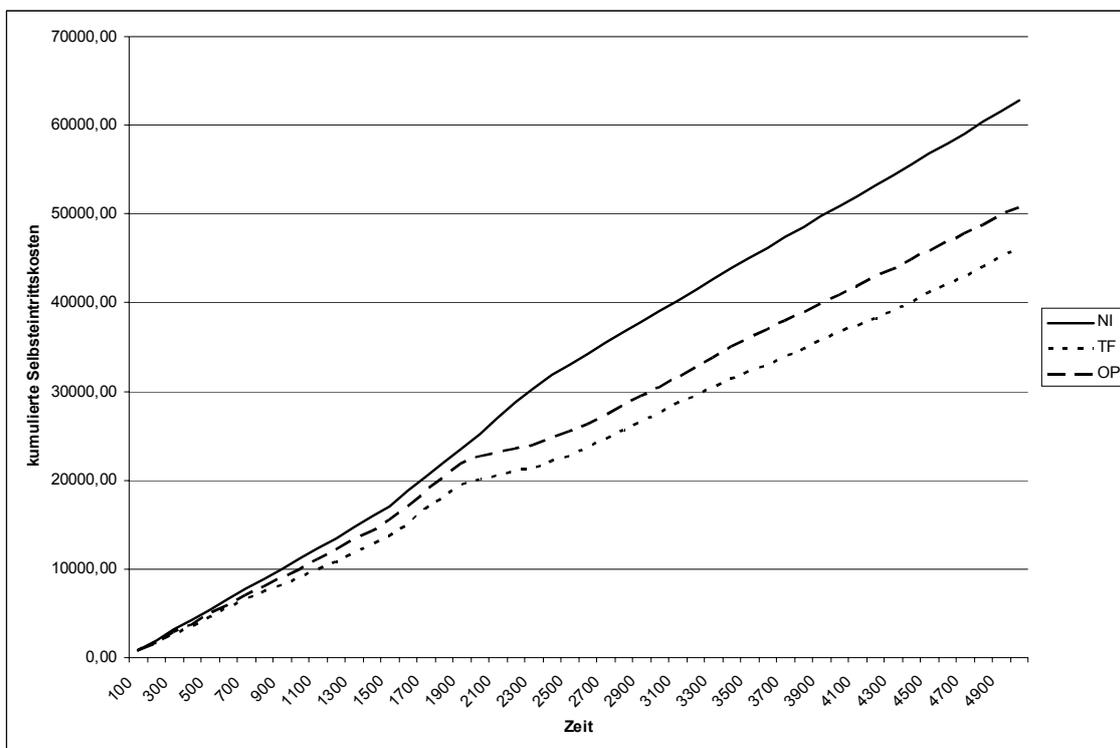


Abbildung 5: Entwicklung der kumulierten Selbsteintrittskosten

In Abbildung 5 sind die Entwicklungen der Kosten für den Selbsteintritt (Fahrstreckenabhängige Kosten für den eigenen Fuhrpark) für die drei Strategien dargestellt. Vor Eintritt der Lastspitze zum Zeitpunkt 1500 ZE können wiederum keine signifikanten Entwicklungsunterschiede bei den drei Kostenkurven festgestellt werden. Nach dem Eintritt des Peaks entwickeln sich die Kosten für die drei Strategien jedoch unterschiedlich, wobei sich die TF- und die OP-Kosten qualitativ ähnlich verhalten. Während die Selbsteintrittskosten im NI-Fall bei Lastspitzeneintritt zunächst leicht überproportional zunehmen, wachsen diese Kosten bei den beiden anderen Strategien nur noch unterproportional an. Nach dem Überwinden des Peaks verlaufen alle Kurven li-

near weiter. Allerdings ist die Steigung im NI-Fall gegenüber den beiden anderen Strategien erhöht, so dass die Unterschiede zwischen den NI- und den TF-Kosten einerseits und den OP-Kosten andererseits immer weiter zunehmen.

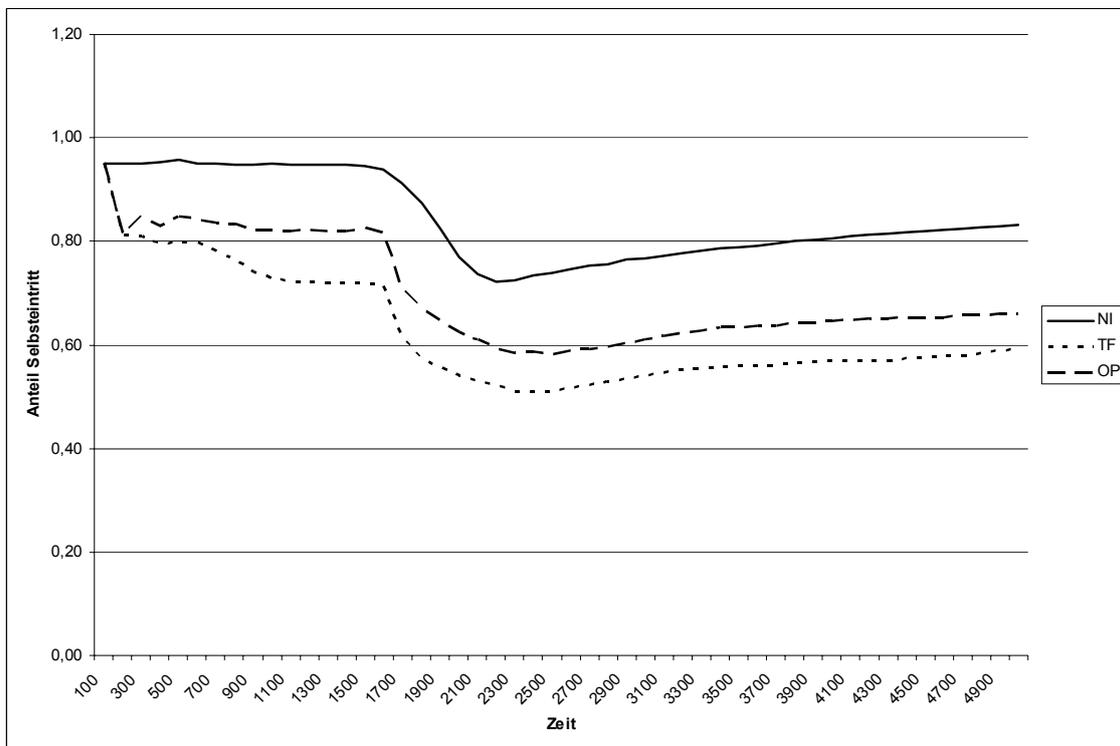


Abbildung 6: Entwicklung des Anteils der im Selbsteintritt erfüllten Aufträge

Die beschriebenen Kostenverläufe deuten darauf hin, dass durch die TF- bzw. OP-Interventionen eine dauerhafte Verkleinerung des Anteils der im Selbsteintritt vorgenommenen Aufträge impliziert wird. In Abbildung 6 sind die Entwicklungen der Anteile der im Selbsteintritt vorgenommenen Aufträge dargestellt. Tatsächlich verschiebt sich der Anteil der im Selbsteintritt erfüllten Aufträge dauerhaft mit Eintritt der Lastspitze. Im NI-Fall sinkt er von ca. 95% auf 83% (zum Zeitpunkt 5000 ZE), im OP-Fall von 82% auf 66% und im TF-Fall sogar von 70% auf 60%. Es ist zu vermuten, dass das dramatische Absinken des Selbsteintritts-Anteils sowohl im TF-Fall als auch im OP-Fall eine Folge der Intervention während der Lastspitze darstellt. Während der Lastspitze hat eine Verschiebung eines Teils der Aufträge zur Fremdvergabe ohne Kostenberücksichtigung stattgefunden, die nach dem Ende der Intervention nicht rückgängig gemacht werden konnte, weil zu wenig Aufträge zur Routenkonsolidierung zur Verfügung standen. Damit kann auch die Kostenüberlegenheit der OP-Strategie über die TF-Strategie erklärt werden, da bei der OP-Strategie die Erzwungung der Fremdvergabe früher eingestellt wird.

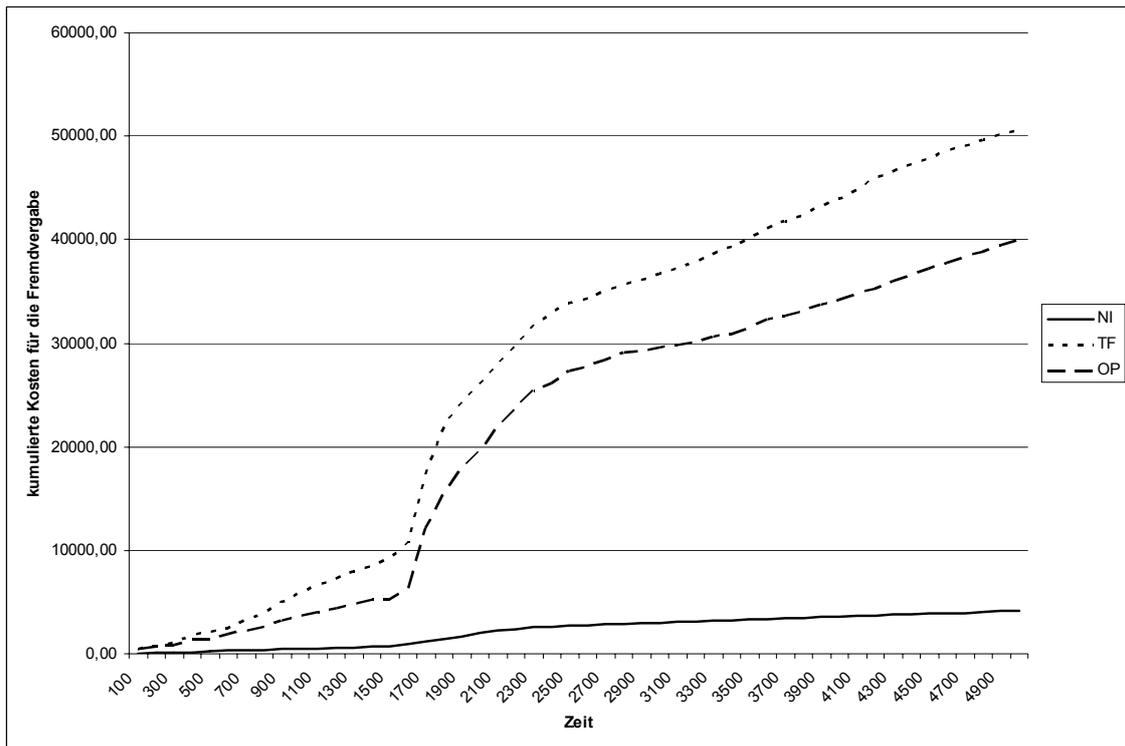


Abbildung 7: Entwicklung der Fremdvergabekosten

Diese Hypothese wird durch die in Abbildung 7 gezeigten kumulierten Kosten für die Fremdvergabe unterstützt. Die aufsummierten Fremdvergabekosten sind sowohl bei der TF- als auch bei der OP-Strategie dramatisch erhöht gegenüber der NI-Strategie. Des Weiteren sind die Steigungen der Kostenverläufe im TF- und OP-Fall wesentlich größer als im NI-Fall. Dies deutet daraufhin, dass die Verschiebung des Selbsteintritts dauerhaft ist. Die Strafkosten für eine verspätete Auftragsausführung spielen in diesem Fall keine Rolle, da sich ihr Funktionsverlauf nach Überwindung des Peaks mit gleicher Proportionalität fortsetzt (Abbildung 8).

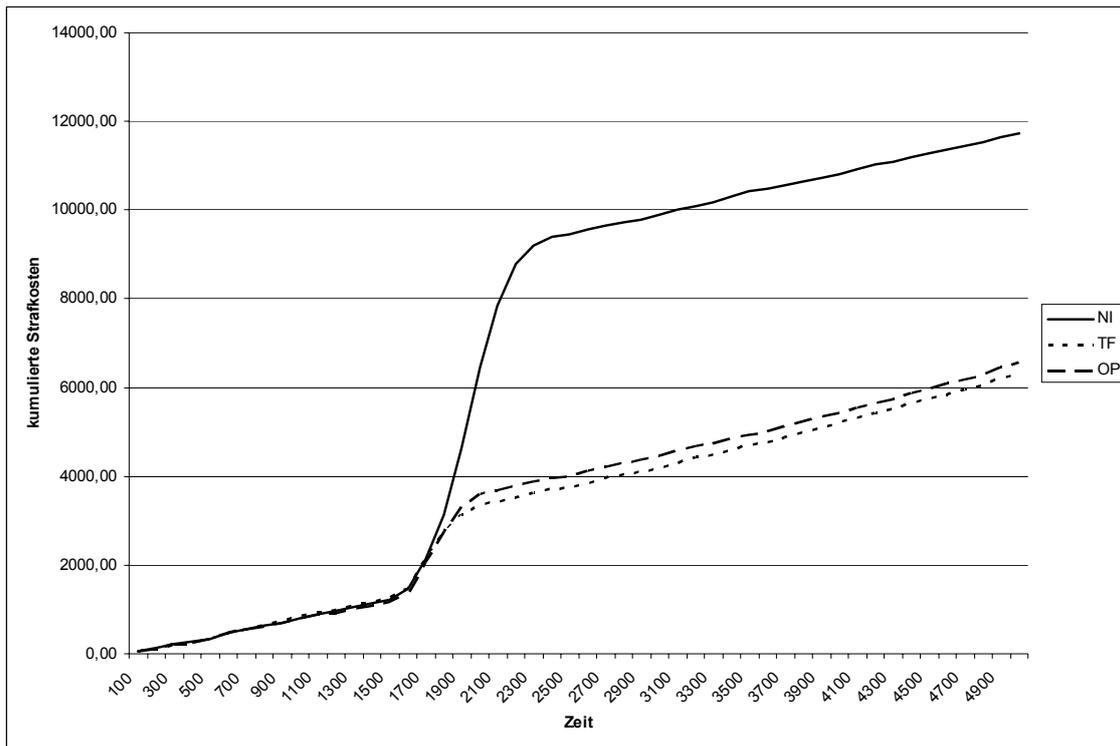


Abbildung 8: Entwicklung der Strafkosten

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, Prozesse der kurzfristigen Planung an veränderte Planungssituationen mit mittelfristigen Zielsetzungen automatisiert anzupassen. Somit kann durch das vorgestellte erweiterte Online-Optimierungsmodell der methodische Bruch zwischen wiederholter kurzfristiger Entscheidungsfindung und einer übergeordneten mittelfristigen Planung überbrückt werden.

Des Weiteren haben wir eine qualitative und quantitative Analyse der Kostenauswirkungen des Einsatzes der Selbstadaption vorgenommen. Die in den durchgeführten numerischen Experimenten ermittelten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass Änderungen von Dispositionsregeln zur Überwindung kurzzeitiger Lastspitzen eine nachhaltige und dauerhafte Veränderung des Verhaltens eines Logistiksystems zur Folge haben können und dementsprechend mit Vorsicht angewendet werden müssen.

Die nächsten Forschungsschritte werden eine Erweiterung und Verallgemeinerung der vorgestellten Methodik umfassen. Insbesondere werden wir die Zahl der zu berücksichtigten Leistungsmerkmale zur Beurteilung der Erfüllung der mittelfristigen Zielsetzungen auf zwei oder noch mehr Parameter erhöhen. Besonders wichtig erscheint uns die Frage, wie die in diesem Aufsatz beschriebene implizite unterschwellige Neukonfiguration eines Logistiksystems als Folge von Dispositionsinterventionen vermieden oder zumindest beschränkt werden kann.

6 Literaturverzeichnis

- 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.