

# Kapazitätssteuerung in der Transportlogistik

## Ein Ansatz zur Ertrags-maximierenden Ressourcen-Allokation im Straßengüterverkehr

*Jörn Schönberger, Herbert Kopfer*

*Lehrstuhl für Logistik, Universität Bremen*

### 1 Einleitung

Durch die Harmonisierung und Liberalisierung der EU-Binnenmärkte sind Transportunternehmen im Straßengüterverkehr in die Lage versetzt worden, Markt- bzw. Nachfrage-orientiert zu agieren. Allerdings sind geeignete Werkzeuge, um vorhandene Transport-Ressourcen wie Laderaum, Container oder Komplettladungen erfolgsmaximal zu allokiieren und insbesondere adäquate (Mindest-)Preise für angebotene Transportleistungen festzulegen bisher nur im Einzelfall verfügbar (Figliozzi, 2007).

Für einen profit-orientiert agierenden Transport-Dienstleister stellt die Selektion von profitablen Transportaufträgen ein zentrales Entscheidungsproblem in der operativen Transportprozess-Planung dar (Feillet, 2002 et al.). Die Trennung von profitablen und unprofitablen Aufträgen für eine bekannte Grundgesamtheit von Aufträgen ist umfassend untersucht (Pankratz, 2002). Dabei werden oftmals auch Fremdvergabe-Möglichkeiten ausgenutzt (Krajewska, 2008). Für den Fall einer zunächst nur partiell bekannten Grundgesamtheit von Anfragen liegen keine umfassenden Ergebnisse vor.

In dieser Arbeit stellen wir einen Kapazitätssteuerungsansatz für Transport-Ressourcen vor und berichten über die Ergebnisse von Simulationsexperimenten zur Evaluierung des vorgeschlagenen Ansatzes. Zunächst überprüfen wir, ob die Voraussetzungen für die Anwendung von Kapazitätssteuerungen im Straßengüterverkehr gegeben sind bzw. welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit eine effektive Kapazitätssteuerung überhaupt möglich ist (Abschnitt 2). Anschließend beschreiben wir das untersuchte Planungsszenario und schlagen eine Problemmodellierung vor (Abschnitt 3). Wir skizzieren das zur Lösung des Modells verwendete Entscheidungsunterstützungssystem in Abschnitt 4. Das Layout der durchgeführten Simulationsexperimente zur Evaluierung des Entscheidungsunterstützungssystems sowie eine Präsentation und Diskussion der beobachteten Ergebnisse sind Gegenstand des Abschnitts 5.

## 2 Kapazitätssteuerung in der operativen Transport-Buchung

Kapazitätssteuerung ist ein Bestandteil des operativen Revenue Managements (Klein und Steinhardt, 2008) und wird zur Entscheidung über die Annahme oder Ablehnung von ggf. sukzessive eintreffenden Reservierungsanfragen für vorgehaltene Ressourcen genutzt. Ursprünglich für die Absatzkontrolle im Passagierluftverkehr konzipiert, werden heute Ansätze der Kapazitätssteuerung in vielen Service-Industrien (Ingold et al., 2007) und im produzierenden Gewerbe (Spengler et al., 2007) angewendet, um eine möglichst profitable Zuteilungen von knappen Ressourcen (z. B. Maschinen oder Dienstleistungen) zu Aufträgen vorzunehmen. Insbesondere Transport-Dienstleister, die eine relativ hohe Grundauslastungsquote durch langfristige Kundenkontrakte besitzen, versuchen vorhandene Restkapazitäten auf dem Spotmarkt Erlös-maximierend zu verkaufen. Dadurch können die insgesamt steigenden Transportnachfragen aufgrund einer effizienteren Fahrzeugauslastung mit einer unterproportionalen Zunahme von Fahrleistungen bewältigt werden (Schaefer, 1993).

Mehrere Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit die Anwendung von Erlös-orientierten Methoden zur Entscheidung über die Annahme von Reservierungsanfragen für knappe Ressourcen erfolgreich sein kann. Kimms und Klein (2005) fassen diese in den folgenden vier Aspekten zusammen.

- *Mangelnde operative Flexibilität* in der Verfügbarkeit der zu reservierenden Ressource: Die verfügbare Restkapazität stellt tatsächlich ein zunehmend knapper werdendes Gut dar. Somit sind Preiserhöhungen für dieses Gut plausibel. In der in dieser Arbeit beschriebenen Anwendung ist die noch verfügbare Kapazität eines LKW für eine vorgegebene Fahrstrecke kurzfristig nicht erweiterbar.
- *Integration eines externen, d. h. durch den Bereitsteller der Ressource nicht beeinflussbaren Faktors*: Dieser externe Faktor führt auf der Nachfrageseite zu Unsicherheit über die zukünftige Ressourcenverfügbarkeit sowie auf der Angebotsseite zu Unsicherheit über die zukünftigen Absatzmengen. Dadurch wird (im Idealfall) verhindert, dass taktische Überlegungen zu überhöhten bzw. zu geringen Preisfestlegungen führen. In der hier untersuchten Konstellation stellt die Unsicherheit über die tatsächliche zukünftige Nachfrage einen durch den Transport-Dienstleister nicht beeinflussbaren externen Faktor dar.
- *Heterogenes Nachfrageverhalten*: Dadurch können durch den Anbieter aus den eintreffenden Aufträgen die profitabelsten ausgewählt werden und die Nachfrager können durch eine Variation ihrer Reservierungsanfrage ggf. auch nach Ablehnung ihrer ursprünglichen Anfrage doch noch eine Leistung erhalten. Wir untersuchen einen Anwendungsfall, in dem Reservierungsanfragen mit unterschiedlichem zeitlichem Vorlauf und für unterschiedliche Relationen gebucht werden.
- *Standardisierbare Leistungen*: Anbieter können Preisuntergrenzen definieren. Für potentielle Nachfrager ist die Kalkulation der Preise nachvollziehbar und ver-

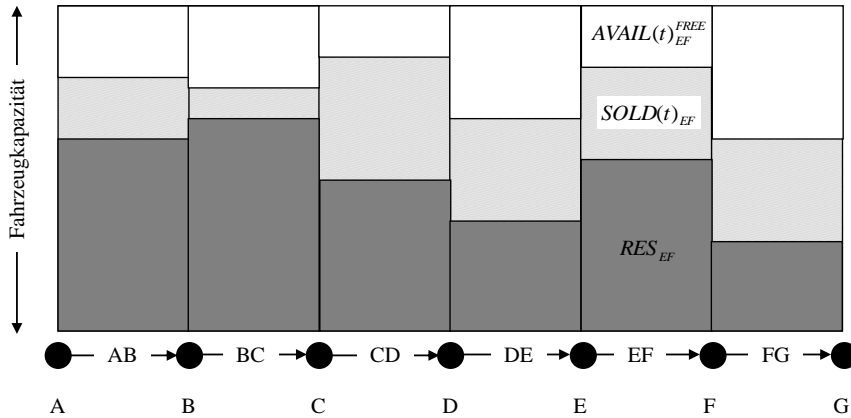
gleichbar. Dadurch wird der Preisbildungsprozess für beide Seiten nachvollziehbar. Diese Transparenz ist auch im untersuchten Szenario gegeben. Die angebotenen Produkte sind klar definiert (Transport von A nach B entlang einer vorgegebenen Route) und die dafür zu zahlenden Preise, die durch die Nachfrager bezahlt werden müssen (und die die Erlöse des Anbieters darstellen), sind ebenfalls beiden Seiten bekannt.

Die Anwendungsvoraussetzungen für eine effiziente und effektive Kapazitätssteuerung im Straßengüterverkehr sind damit prinzipiell erfüllt.

### 3 Dynamische Kapazitätssteuerung in der Transportplanung

In diesem Abschnitt beschreiben wir ein spezielles (simuliertes) Szenario, in dem die Entscheidung über Annahme und Ablehnung von sukzessive, d. h. dynamisch während der Vorbereitung der LKW-Fahrt (Buchungsphase) eintreffende Reservierungsanfragen die zentrale Herausforderung darstellt. Wir betrachten einen LKW mit fixer Kapazität. Für diesen LKW ist im Rahmen einer taktischen Fahrplangestaltung die Route  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G$  festgelegt worden (vgl. Abbildung 1). Längerfristige Verträge mit Kunden erfordern eine regelmäßige Bedienung der Relationen (Teilstrecken), die durch diese Route bedient werden. Aufgrund dieser bestehenden Verträge ist für jede Teilstrecke (beispielsweise  $E \rightarrow F$ ) ein Teil der Gesamtfahrzeugkapazität (bezeichnet mit  $RES_{EF}$ ) bereits für die Vertragskunden reserviert. Ob und zu welchem Teil diese Kapazitäten benutzt werden, wird durch jeden Kunden individuell und kurzfristig entschieden, so dass im Vorfeld der Ausführung der Route für einen bestimmten Tag die in Abbildung 1 dunkel grau eingefärbten Kapazitäten für die einzelnen Teilstrecken auf jeden Fall für die Vertragskunden vorgehalten werden müssen.

*Ressourcen-Schema.* Mit  $R_{XY}$  bezeichnen wir die durch das betrachtete Fahrzeug auf der Teilstrecke  $X \rightarrow Y$  vorgehaltene Kapazität und interpretieren die Menge der Kapazitäten auf den Streckenabschnitten als Ressourcen, die zur Leistungserstellung genutzt werden können. Aufgrund der bestehenden Verträge steht auf einer Teilstrecke nicht die komplette Fahrzeugkapazität zur Verfügung. Wir bezeichnen mit  $RES_{XY}$  die Kapazität, die für Vertragskunden reserviert werden muss. Somit steht am Anfang der Buchungs- bzw. Verkaufsphase zum Zeitpunkt  $t=0$  auf der Teilstrecke  $X \rightarrow Y$  die Kapazität  $R_{XY} - RES_{XY}$  zur Verfügung. Mit jeder Kapazitätsreservierung für einen Auftrag, der die (Teil-)Strecke  $X \rightarrow Y$  beinhaltet, wird diese disposable Ressource weiter reduziert. Zum Zeitpunkt  $t$  ist für die Teilstrecke  $X \rightarrow Y$  insgesamt seit Beginn der Buchungsphase die Kapazität  $SOLD_{XY}(t)$  verkauft worden (hell grau eingefärbte Flächen in Abbildung 1), so dass zum Zeitpunkt  $t$  auf der Teilstrecke  $X \rightarrow Y$  noch die Kapazität  $AVAIL_{XY}(t) = R_{XY} - RES_{XY} - SOLD_{XY}(t)$  verfügbar ist. Im Verlauf der restlichen Buchungsphase muss nun versucht werden, diese verfügbaren Ressourcen für angefragte Transportaufträge zu reservieren.



**Abbildung 1: Schema verfügbarer Ressourcen**

Wir setzen voraus, dass die Kosten für die Ausführung der Route nicht (oder nur unwesentlich) von der Auslastung des LKWs abhängen. Somit trägt der durch den Verkauf eines Auftrags erzielte Erlös, für den ein Teil der verfügbaren Ressource reserviert wird, zu einer Erhöhung des durch die Erbringung der Transportleistung (durch die gefahrene Route) erbrachten Deckungsbeitrags bei. Übersteigt der Ressourcenbedarf der nachgefragten Transportleistungen die verfügbare Restkapazität auf einer oder auf mehreren Teilstrecken der vorab festgelegten Route, so muss für jeden einzelnen Auftrag entschieden werden, ob er akzeptiert wird (und entsprechende Ressourcen blockiert werden) oder nicht.

*Online Reservierung von Transportressourcen.* Anfragen nach Transportleistungen werden sukzessive an den Transport-Dienstleister herangetragen. Es ist für jede eintreffende Anfrage/für zeitgleich eintreffende Anfragen umgehend zu entscheiden, ob die Anfrage(n) akzeptiert wird (werden) oder nicht. Somit liegt ein dynamisches Entscheidungsproblem vor.

Mit dem Bekanntwerden einer oder mehrerer neuen/neuer Anfrage(n) nach einer Transportleistung wird ein Zyklus für eine Ressourcenbelegungsplanung angestoßen. Es ist jeweils zu entscheiden, ob die aktuelle(n) Reservierungsanfrage(n) akzeptiert wird(werden) oder nicht. Im ersten Fall sind Kapazitäten auf den benötigten Transportmitteln unwiderruflich zu reservieren. Im letzten Fall werden keine Reservierungen durchgeführt. Ausgehend von den zu einem Zeitpunkt  $t$  noch verfügbaren Restkapazitäten  $AVAIL_{XY}(t)$  wird reaktiv über die Annahme von Anfragen entschieden. Der Anteil der reservierten Ressourcen bleibt bis zum Eintreffen der nächsten Reservierungsanfrage auf jeden Fall unverändert. Somit kann das skizzierte dynamische Entscheidungsproblem als Online-Entscheidungsmodell, bestehend aus einer Sequenz  $M_0, M_1, M_2, \dots$  von sukzessive zu lösenden Entscheidungsmodellen repräsentiert werden. Das zum Zeitpunkt  $t_i$  bestehende Entscheidungsproblem wird als „Instanz“  $P_i$  bezeichnet und  $M_i$  bezeichnet ein

Entscheidungsmodell für  $P_i$ . Somit reduziert sich das dynamische Entscheidungsproblem auf die sukzessive Lösung der Entscheidungsmodelle  $M_0, M_1, M_2, \dots$ . Bei der Erstellung des Modells  $M_i$  ist zu berücksichtigen, dass die für die Strecke  $X \rightarrow Y$  noch verfügbare Ressourcenmenge  $AVAIL_{XY}(t_i)$  sich aus der Gesamtkapazität der vorhandenen Ressourcen reduziert um die zu allen vorherigen Reservierungszeitpunkten  $t_0, t_1, \dots, t_{i-1}$  bereits getroffenen Reservierungen ergibt.

Die genauen Zeitpunkte sowie der Umfang der zukünftig benötigten Ressourcen (Kapazitäten) sind zum Zeitpunkt  $t_i$  unbekannt. Um dennoch die Aufstellung eines (formalen) Entscheidungsmodells zu ermöglichen, muss die zukünftige Nachfrage durch Prognosen approximiert werden. Eine Überschätzung der zukünftigen noch ausstehenden Kapazitätsnachfrage führt tendenziell zu einer Zurückhaltung bei der Reservierung von Kapazitäten für aktuell anfragende Transportaufträge. Daraus resultiert eine tatsächliche Unterauslastung der Transportressource(n) am Schluss der Buchungsphase. Demgegenüber ist zu erwarten, dass eine systematische Unterschätzung der zukünftigen Nachfrage tendenziell zu einer Erschöpfung der verfügbaren Kapazitäten noch während der Buchungsphase vor der Ausführung der Operationen durch die gebuchten Ressourcen führt.

Ziel der dynamischen Auftragsannahme-Entscheidung ist es, aus den eingehenden Anfragen diejenigen auszuwählen, für die eine Kapazitätsreservierung insgesamt zu einer Maximierung der Summe der durch die Auftragsübernahme realisierten Erlöse führt.

*Auftragsannahme-Entscheidung.* Entscheidungen über die Auftragsannahme können entweder unter Ignorierung oder unter Berücksichtigung der prognostizierten zukünftigen Nachfrage getroffen werden. Im erstgenannten Fall stellen die noch verfügbaren Restkapazitäten der Transportressourcen, die Erlöse für übernommene Aufträge sowie die aktuellen Reservierungsanfragen die in der Annahmendeckung zu berücksichtigenden Problemparameter dar. Wir bezeichnen das resultierende dynamische Entscheidungsproblem als myopisches Annahmeproblem, denn es wird eine kurzfristige Erlösmaximierung ohne Berücksichtigung möglicher zukünftiger Ressourcenbedarfe getroffen. Wenn immer Reservierungsanfragen bekannt werden, entsteht ein neues myopisches Selektionsproblem  $P_i$ .

Das zum Zeitpunkt  $t_i$  zu lösende myopische Annahmeproblem  $P_i$  wird durch das gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsmodell (1)-(4) repräsentiert. Die zum Zeitpunkt  $t_i$  zu berücksichtigenden und zu analysierenden Reservierungsanfragen fallen in  $J_i$  verschiedene Auftragsklassen. Jede Klasse repräsentiert einen Auftragsstyp. Ein Auftragsstyp wird durch den Aufladeort und den Zielort des betrachteten Transportguts beschrieben.

$$\sum_{j=1}^{J_i} r_j x_j(t_i) \rightarrow \max \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{J_i} \alpha_{jk} x_j(t_i) \leq AVAIL_k(t_i) \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (2)$$

$$x_j(t_i) \leq W_j(t_i) \quad \forall j = 1, \dots, J_i \quad (3)$$

$$x_j(t_i) \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad \forall j = 1, \dots, J_i \quad (4)$$

Der Einfachheit halber nehmen wir an, dass jeder Auftrag unabhängig vom Typ pro Routensegment (d. h. pro Ressource) einen Kapazitätsbedarf von einer Mengeneinheit hat, d. h.  $AVAIL_k(t_i)$  wird um eins reduziert, falls ein gerade akzeptierter Auftrag die Teilstrecke  $k$  benutzt. Für jeden Auftragsyp  $j$  ist die Anzahl  $x_j(t_i)$  der zum Zeitpunkt  $t_i$  zu akzeptierenden Anfragen zu bestimmen. Die  $x_j(t_i)$  stellen die Entscheidungsvariablen im Optimierungsmodell (1)-(4) dar. Pro akzeptiertem Auftrag vom Typ  $j$  wird ein Erlös von  $r_j$  erzielt. Ziel ist es, die Summe der Erlöse aller Auftragsypen zu maximieren (1). Dabei darf die für die einzelnen Teilstrecken  $k=1, \dots, K$  verfügbare Kapazität  $AVAIL_k(t_i)$  nicht überschritten werden (2). Der binäre Parameter  $\alpha_{jk}$  ist genau dann 1, wenn der Auftragsyp  $j$  die Ressource  $k$  beansprucht. Pro Auftragsyp darf das Kontingent nicht größer als die Anzahl der für diesen Auftragsyp vorliegenden Reservierungsanfragen  $W_j(t_i)$  sein (3). Die Kontingente müssen entweder 0 oder positiv und ganzzahlig sein (4).

Das Modell (1)-(4) stellt ein erweitertes mehrdimensionales Rucksackproblem dar. Die Erweiterung des Standardmodells, bestehend aus (1), (2) und (4), durch die Nebenbedingungsfamilie (3) ist notwendig, damit zum Zeitpunkt  $t$  nur eine Reservierung für tatsächlich vorliegende Anfragen erfolgt. Da zukünftig noch eintreffende Reservierungsanfragen im Modell (1)-(4) keine Berücksichtigung finden, stellt die sukzessive Lösung der Instanzen des Online-Optimierungsmodells  $M_0, M_1, \dots$  eine Realisierung der „First Come / First Serve“ Annahmestrategie (FCFS) dar. Solange die verfügbaren Kapazitäten  $AVAIL_k(t_i)$  noch nicht erschöpft sind, werden alle eintreffenden Reservierungsanfragen akzeptiert. Sofern zum Zeitpunkt  $t$  aufgrund der noch vorhandenen Kapazitäten nicht alle Anfragen eines Typs  $j$  angenommen werden können, so werden zufällig  $x_j(t_i)$  Aufträge vom Typ  $j$  zur Annahme ausgewählt.

Falls die in der Lösung des Modells (1)-(4) ermittelten Kontingente  $x_j(t_i)$  so groß gewählt werden, dass für eine oder mehrere Ressourcen (Teilstrecken) die vorhandene(n) Restkapazität(en) vollständig ausgeschöpft werden, so können im weiteren Verlauf der Buchungsphase (in nachfolgenden Instanzen des Onlinemodells) keine weiteren Reservierungsanfragen mehr akzeptiert werden, die eine oder

mehrere der ausgeschöpften Ressourcen benötigen. Daher ist zum Zeitpunkt  $t_i$  abzuwägen, ob eine vorliegende und mit Sicherheit zu einem Erlös führende Anfrage akzeptiert wird, oder ob spekuliert wird, dass zu einem späteren Zeitpunkt noch Reservierungsanfragen eintreffen, deren Akzeptanz zu einem höheren Erlös führen. Im letzteren Fall dürfen zum Zeitpunkt  $t_i$  die ermittelten Kontingente nicht vollständig ausgeschöpft werden. Falls zu erwarten ist, dass die noch verfügbaren Restkapazitäten nicht mehr für alle noch im restlichen Verlauf der Buchungsperiode erwarteten Anfragen ausreichen, so ist für jede Reservierungsanfrage zu prüfen, ob die mit der Akzeptanz einhergehenden Erlöse die Kosten für die Abweisung spätere eintreffender Anfragen (Opportunitätskosten der Akzeptanz einer Anfrage) übersteigen oder nicht. Im ersteren Fall ist die aktuell vorliegende Anfrage zu akzeptieren, im letzteren Fall ist die Anfrage zurückzuweisen.

$$x_j(t_i) \leq \text{EST}_j(t_i) \quad \forall j = 1, \dots, J_i \quad (5)$$

Die Restriktionsfamilie (3) des Modells (1)-(4) des myopischen Problems wird durch die Familie (5) ersetzt, die den Umfang des zu reservierenden Kontingents eines Auftragsstyps nicht durch die aktuelle tatsächlich bekannte Nachfrage, sondern durch die insgesamt noch im Buchungsverlauf zu erwartende Nachfrage ersetzt. Somit stellt das neu entstandene Optimierungsmodell (1), (2), (4) und (5) eine Relaxierung des Modells (1)-(4) des myopischen Problems dar. Wir nennen das relaxierte Problem antizipatives Problem, da die zukünftig erwartete Nachfrage explizit berücksichtigt wird. In der Literatur (u. a. Klein und Steinhardt, 2008) wird dieses Modell auch als Erwartungswertmodell bezeichnet.

Da das antizipative Problem eine Relaxierung der tatsächlich zum Zeitpunkt  $t$  bestehenden Entscheidungssituation darstellt, können die ermittelten Kontingente nicht zur Entscheidung über die Annahme oder Ablehnung einer aktuell gestellten Reservierungsanfrage genutzt werden. Wir verzichten daher auch auf die Ganzzahligkeit (4) der zu ermittelnden Kontingente. Somit stellt das Modell des antizipativen Problems ein lineares Optimierungsmodell dar, das beispielsweise durch das Simplex-Verfahren gelöst werden kann. Aus der Lösung dieses Modells können wir die Opportunitätskosten quantifizieren, die aus der Annahme einer Reservierungsanfrage resultieren (Klein, 2007).

Zunächst werden aus der Lösung des Modells des antizipativen Problems die zum Zeitpunkt  $t$  bestehenden Opportunitätskosten für die einzelnen Ressourcen (Teilstrecken) abgelesen. Diese sind identisch mit den sog. Schattenpreisen der vorhandenen Ressourcen (Klein und Steinhardt, 2008). Bei Verwendung des Simplex-Verfahrens zur Lösung des linearen Modells (1), (2) und (5) steht der zum Zeitpunkt  $t$  resultierende Schattenpreis  $\pi_{tk}$  der Ressource (Teilstrecke)  $k$  im End-Tableau in der Zielfunktionszeile in der Spalte der Schlupfvariable, die zur Kapazitätsbeschränkungs-Restriktion (2) der Ressource  $k$  führt. Bertsimas und Popescu

(2003) schlagen vor, als Bid-Price  $BP_{ij}$  für eine zum Zeitpunkt  $t$  gestellte Reservierungsanfrage des Typs  $j$  die Summe der Schattenpreise der durch den Typ  $j$  beanspruchten Ressourcen (6) zu verwenden. Dabei ist der binäre Parameter  $\beta_{jk}$  genau dann 1, wenn der Auftragsartyp  $j$  die Ressource  $k$  beansprucht.

$$BP_{ij} := \beta_{j1}\pi_{t1} + \dots + \beta_{jk}\pi_{tk} \quad (6)$$

Der Bid-Price  $BP_{ij}$  stellt den Mindesterlös dar, der mit dem zu einer akzeptierten Reservierung gehörenden Auftrag erzielt werden muss, um unter Berücksichtigung von möglichen Verdrängungen zukünftiger Anfragen durch die Akzeptanz der aktuell vorliegenden Anfrage eine erwartete erlösmaximale Entscheidung treffen zu können. Durch die Annahme einer Anfrage reduziert sich der noch verfügbare Umfang der Ressourcen. Die Schattenpreise der einzelnen Ressourcen müssten daher aktualisiert und der Bid-Price für die involvierten Auftragsarten neu berechnet werden. Aus Vereinfachungsgründen sehen wir in dieser Arbeit davon ab und weisen allen zum Zeitpunkt  $t$  zu bearbeitenden Reservierungsanfragen den in (6) berechneten Bid-Price zu. Somit stellt die Bid-Price-basierte Annahme-Politik eine heuristische Politik dar.

*Testprobleme.* Zur Evaluierung des FCFS-Ansatzes und des Bid-Price Steuerungskonzepts (BP) haben wir Testszenarien generiert. Jede Testinstanz umfasst eine vorgegebene Route eines LKWs sowie einen Strom eintreffender Reservierungsanfragen.

Der LKW hat eine Kapazität von 10 Mengeneinheiten (ME). Die Route besteht aus 49 Teilstrecken (d. h.  $K=49$ ). Ein Auftragsartyp wird durch den Abhol- und den Abladeort entlang der Route festgelegt. Somit gibt es  $J=1225$  Auftragsarten. Der mit einem Auftrag vom Typ  $j \in J$  erzielbare Erlös beträgt eine Geldeinheit (GE) pro Streckenabschnitt zwischen je zwei aufeinander folgenden Stopps in der Route des LKW. Ein Auftrag beansprucht pro Teilstrecke eine Mengeneinheit Kapazität.

Die Länge der Buchungsperiode, in der Reservierungsanfragen eintreffen, beträgt 100 Zeiteinheiten. Es werden insgesamt 500 Reservierungsanfragen erzeugt. Der Zeitpunkt der Anfrage ist gleichverteilt über die gesamte Buchungsperiode. Pro Zeitpunkt werden bis zu 12 Anfragen gleichzeitig gestellt. Der Aufladeort sowie der Abladeort werden zufällig entlang der vorgegebenen Route festgelegt. Damit wird auch der Auftragsartyp zufällig spezifiziert. Insgesamt werden zehn verschiedene Anfragesequenzen  $\delta=1, \dots, 10$  erzeugt.

Wir möchten überprüfen, ob die Qualität der Vorhersage bzw. der Prognose der noch zu erwartenden Reservierungsanfragen einen Einfluss auf die Ziel-Angemessenheit der zu einem Zeitpunkt getroffenen Annahmementscheidungen hat. Daher kombinieren wir jede der erzeugten Anfragesequenzen mit den elf folgenden Prognosequalitäten  $\omega \in \{50, 60, \dots, 150\}$ . Die Prognosequalität  $\omega$  gibt die Prozentzahl der Schätzung der tatsächlichen zukünftigen Nachfrage an ( $\omega=80$



bedeutet, dass nur 80% der zukünftigen Nachfrage prognostiziert werden und  $\omega=110$  führt zu einer 10%-igen Überschätzung der zukünftigen Nachfrage). Insgesamt stehen somit  $10 \cdot 11 = 110$  dynamische Entscheidungsszenarien für Simulationsexperimente zur Verfügung.

## 4 Automatisierte Annahmeentscheidung

Die Formalisierung des Entscheidungsproblems über die Annahme von Reservierungsanfragen stellt eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendung automatischer Entscheidungsunterstützungssysteme dar. Aufgrund der sukzessiv eintreffenden Reservierungsanfragen ist eine Sequenz von Entscheidungsproblemen zu bearbeiten. Dafür haben wir ein rollierend-planendes Ressourcen-Allokationssystem entwickelt. Mit dem Eintreffen einer einzelnen oder mehrerer gemeinsam eintreffender/eintreffenden Reservierungsanfrage(n) wird ein neuer Allokationszyklus gestartet. Die getroffenen Entscheidungen sind nicht revidierbar, d. h. eine einmal akzeptierte Anfrage kann zu einem späteren Zeitraum nicht wieder zurückgegeben werden.

Zu Beginn eines Planungszyklus werden zunächst die verbleibenden Kapazitäten  $AVAIL_k(t)$  auf den einzelnen Teilstrecken der LKW-Route ermittelt. Schließlich wird die erwartete verbleibende Nachfrage auf den Relationen entlang der LKW-Route bestimmt. Diese zwei Klassen von Daten werden dann verwendet um die aktuelle Instanz des Entscheidungsproblems durch das Modell (1), (2) und (5) zu definieren. Dieses lineare Entscheidungsmodell wird anschließend gelöst. Dafür verwenden wir den Solver *lp\_solve*, der ein Simplex-Verfahren zur Lösung linearer Modelle nutzt ([http://lp\\_solve.sourceforge.net/5.5](http://lp_solve.sourceforge.net/5.5)).

Aus dem erzeugten End-Tableau lesen wir die Schattenpreise der Ressourcen ab und ermitteln die Bid-Prices für die einzelnen Auftragsstypen. Für alle vorliegenden Reservierungsanfragen werden die zugehörigen Erlöse mit den ermittelten Bid-Prices verglichen. Ist der jeweilige Erlös größer oder gleich dem Bid-Price, so wird die entsprechende Reservierungsanfrage akzeptiert. Ansonsten wird die Anfrage zurückgewiesen. Im ersten Fall werden die noch vorhandenen Kapazitäten auf den benutzten Teilstrecken reduziert.

## 5 Simulationsexperimente

Zunächst beschreiben wir das Layout der durchgeführten Simulationsexperimente. Anschließend präsentieren und analysieren wir die beobachteten Resultate.

Das vorgestellte Entscheidungsunterstützungssystem wurde unter Verwendung der in Abschnitt 3 entwickelten Testszenarien evaluiert. Während der simulierten Buchungsperioden wurden verschiedene Parameterwerte aufgezeichnet und zu aussagekräftigen Kennzahlen aggregiert.

Zunächst vergleichen wir die Veränderung der Performance des automatischen Akzeptanz-Entscheidungssystems nach einem Wechsel von der FCFS- zur Bid-Price-Strategie bei einer  $\omega$ -Güte der verwendeten Nachfrageprognose (BP- $\omega$ ). Die relative Veränderung  $ACC(\omega)$  der Anzahl der akzeptierten Aufträge wird berechnet, ebenso wie die relative Veränderung  $REV(\omega)$  der erzielten Erlöse. Schließlich wird noch die relative Veränderung  $CAP(\omega)$  des Anteils der genutzten Kapazität analysiert.

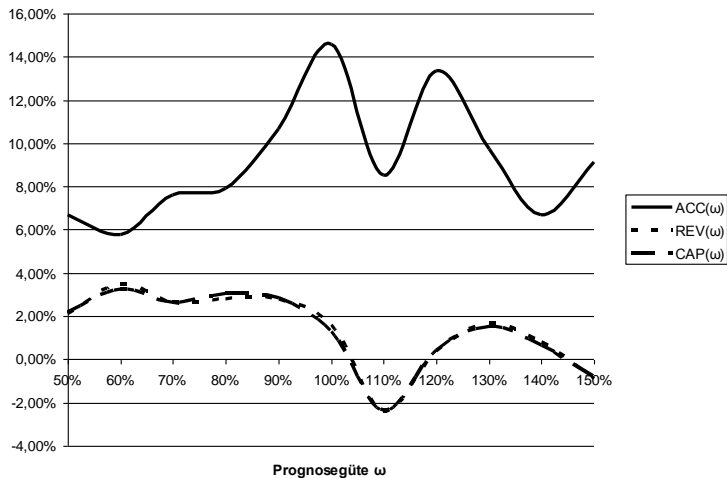
In einer Offline-Analyse werden nach Beendigung einer Simulation die FCFS- sowie die BP-Strategien verglichen. Abbildung 2 zeigt die relative Erhöhung der Anzahl der akzeptierten Reservierungsanfragen (durchgezogener Graph) gegenüber der FCFS-Strategie bei verschiedenen Prognosegenauigkeiten, falls eine Bid-Price-basierte Akzeptanz-Entscheidung getroffen wird. Für alle beobachteten Prognose-Qualitäten  $\omega$  ist die BP-Strategie der FCFS-Strategie überlegen. Falls die Prognose sehr ungenau ist ( $\omega \leq 0.8$  sowie  $\omega \geq 1.3$ ), werden immer noch 6% mehr Aufträge angenommen als bei der FCFS-Strategie. In allen anderen Fällen werden gegenüber der FCFS-Anwendung mindestens 8% mehr Aufträge akzeptiert. Falls die Prognose genau ist ( $\omega \approx 1.00$ ), so werden sogar bis zu 15% mehr Aufträge als durch die FCFS-Strategie akzeptiert.

Falls die Anzahl zukünftiger Reservierungsanfragen vorsichtig geschätzt wird ( $\omega \leq 1$ ), so steigen bei Anwendung einer BP-Strategie auch die erzielten Erlöse (REV) sowie die Kapazitätsauslastung (CAP) des LKW gegenüber der Auslastung bei Anwendung der FCFS-Strategie (gepunktete bzw. gestrichelte Linie in Abbildung 2). Die beobachteten Zuwächse betragen zwischen 1% und 3.5%. Im Falle einer Überschätzung der Anzahl der zukünftig auftretenden Anzahl von Reservierungsanfragen sind geringere Zuwächse bzw. sogar Rückgänge der Erträge sowie der Kapazitätsauslastung gegenüber dem FCFS-Fall zu beobachten.

Die Analyse der vorherigen Ergebnisse zeigt deutlich, dass eine gute Schätzung der erwarteten Reservierungsnachfrage von substantieller Bedeutung für die Maximierung der Annahmquoten ist. Eine Überschätzung der verbleibenden Nachfrage führt jedoch zu einer Reduzierung der Erträge gegenüber der FCFS-Strategie, die jedoch mit einem wesentlich geringeren Entscheidungsaufwand (kein Lösen von Optimierungsmodellen) auskommt.

## 6 Zusammenfassung

In diesem Artikel haben wir einen Bid-Price-orientierten Ansatz zur Kapazitätssteuerung für einen LKW im Straßengüterverkehr entwickelt. Zur Evaluierung des vorgestellten Entscheidungsunterstützungssystems wurden künstliche Auftragseingangsströme definiert. Die für das vorgestellte Verfahren beobachteten Ergebnisse wurden mit den Ergebnissen aus den Experimenten mit dem Referenzverfahren First-Come/First-Serve verglichen. Es ist gezeigt worden, dass selbst bei einer ungenauen Prognose der noch zu erwartenden Kapazitäts-Nachfrage die Erträge



**Abbildung 2: Offline-Analyse: Zusammenhang zwischen Prognosegenauigkeit sowie Anzahl akzeptierter Aufträge, erzielten Erträgen und Kapazitätsauslastung.**

um 2% bis 3% gesteigert werden können gegenüber dem Referenzverfahren. Eine Steigerung in gleicher Größenordnung ist für die Kapazitätsauslastung beobachtet worden.

In nachfolgenden Forschungen ist zunächst zu untersuchen, warum eine geringe Überschätzung der zukünftigen Nachfrage zu einem so signifikanten Leistungsverlust des Bid-Price-Verfahrens führt. Des Weiteren muss geklärt werden, welche Auswirkungen verschiedene Strukturen der Nachfrage auf die Erträge bzw. die Kapazitätsauslastung haben. Schließlich stellt sich das besondere Problem, wie für mehr als einen LKW gleichzeitig über die Annahme bzw. Ablehnung von Reservierungsanfragen mit Hilfe von Konzepten der Kapazitätssteuerung entschieden werden kann.

## Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 637 „Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ (Teilprojekt B7), gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG).

## Literatur

Bertsimas, D.; Popescu, I. (2003) Revenue Management in a Dynamic Network Environment. In: *Transportation Science*, 37 [3], S. 257-277.

- Feillet, D.; Dejax, P.; Gendreau, M. (2005) Traveling Salesman Problems with Profits. In: *Transportation Science*, 39 [2], S. 188–205.
- Figliozzi, M.A.; Mahmassani, H.; Jaillet, P. (2007) Traveling Pricing in Dynamic Vehicle Routing Problems. In: *Transportation Science*, 41 [3], S. 302–318.
- Ingold, A.; Yeoman, I.; McMahon, U. (2007) *Yield Management: Strategies for the Service Industries*. Thomson Learning, London, 2. Auflage.
- Kimms, A.; Klein, R. (2005) Revenue Management im Branchenvergleich. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Ergänzungsheft 1*, „Revenue Management“, S.1-30.
- Klein, R.; Steinhardt, C. (2008) *Revenue Management*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Klein, R. (2007) Network capacity control using self-adjusting bid-prices. *OR Spectrum*, 29, S. 39-60.
- Krajewska, M. (2008) Potentials for efficiency increase in modern freight forwarding, Gabler, Wiesbaden.
- Pankratz, G. (2002) *Dynamische speditionelle Transportdisposition unter besonderer Berücksichtigung der Fremdvergabe*. Deutscher Universitäts-Verlag, Gabler Edition Wissenschaft, Wiesbaden.
- Schaefer, T. (1993) *Güterverkehr im Spannungsfeld von Ökonomie und Ökologie*. In: *Wirtschaftspolitische Diskurse 54*. Friedrich-Ebert-Stiftung, Bonn.
- Spengler, T.; Rehkopf, S.; Volling, T. (2007): Revenue management in make-to-order manufacturing – an application to the iron and steel industry, *OR Spectrum*, 29, S. 157-171