

Effizientes Tauschen der Zeitfenster von Transportaufträgen in Truck Appointment Systems

Efficient Swapping of Time Windows of Transport Orders in Truck Appointment Systems

Ann-Kathrin Lange, Michaela Grafelmann, Anne Schwientek, Carlos Jahn,
TU Hamburg, Hamburg (Germany),
ann-kathrin.lange@tuhh.de, michaela.grafelmann@tuhh.de, a.schwientek@tuhh.de,
carlos.jahn@tuhh.de

Abstract: Due to increasing demands on water-side handling efficiency of container terminals in recent years, there are large land-side peaks in truck arrivals and correspondingly long traffic jams at terminal gates. One possible solution to reduce these peaks is to introduce a truck appointment system. Research focuses on optimization methods that assign optimal time windows to trucking companies for their orders. However, the time windows booked in previous studies can usually no longer be changed, while in practice a more flexible approach is necessary. The exchange of time windows between orders within a trucking company is particularly common there. Therefore, this study compares the influence of different algorithms on the time window exchange for trucking companies of different sizes. In order to map the complex processes between the participants in the port, a discrete-event simulation model is used in which the respective exchange algorithms are integrated.

1 Einführung

Der weltweite Seehandel steigt kontinuierlich, allein 2018 um 4 Prozent im Vergleich zum Vorjahr (UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT, 2019). Gleichzeitig wachsen die Schiffsgrößen weiter, da Reeder Skaleneffekte nutzen, um Personal- und Betriebskosten einzusparen. Dadurch haben sich die Anforderungen an die Umschlageffizienz von Container Terminals (CT) in den vergangenen Jahren deutlich erhöht. So wird von den Terminals wasserseitig eine hohe Produktivität gefordert, die landseitig zu großen Peaks bei den Lkw-Ankünften führt und dementsprechend lange Staus an den Terminal-Gates und auf dem -gelände verursacht. Eine mögliche Lösung, um diese Peaks zu reduzieren und somit Terminalprozesse zu verbessern und gleichzeitig Wartezeiten für die Lkw-Fahrer zu verringern, ist die Einführung eines Truck Appointment Systems (TAS). Die Auswirkungen von TAS auf CT und Fuhrunternehmen wurden in den letzten 15

Jahren verstärkt untersucht (Huynh et al., 2016). Dabei werden u. a. Optimierungsmethoden entwickelt, die Fuhrunternehmen optimale Zeitfenster für ihre Aufträge zuordnen. Allerdings können die gebuchten Zeitfenster in bisherigen Studien meistens nicht mehr verändert werden, während in der Praxis ein flexiblerer Ansatz notwendig ist. So werden zumeist optimale Zeitfenster für einen Tag bestimmt und den Lkw-Touren zugeordnet. In Realität haben aber unterschiedliche Störgrößen, wie z. B. Verkehrssituation, Wetter und Abfertigungsgeschwindigkeit an den CT und logistischen Knoten einen Einfluss auf die Fahr- und Bearbeitungszeiten der Lkw. Somit ist die dynamische Anpassung der Pläne eines Fuhrunternehmens vor Vergabe eines neuen Auftrags an einen Lkw notwendig. Fahrer von Fuhrunternehmen, die sich auf hafeninterne Umfuhren zwischen logistischen Knoten und CT spezialisiert haben (engl. „Drayage“ oder „Inter-terminal-transport“), schaffen je nach örtlichen Gegebenheiten zwischen vier und zwölf Umfuhren pro Tag. Zur Erhöhung der Flexibilität können solche Fuhrunternehmen intern die Zeitfenster für verschiedene Aufträge bei einem logistischen Knoten tauschen. Wie ein solcher Tauschprozess stattfinden sollte und welche Auswirkungen er auf Fuhrunternehmen verschiedener Größe hätte, wurde nach Kenntnis der Autoren bisher nicht untersucht. Deshalb wird hier eine notwendige Grundlage geschaffen, um zukünftig verschiedene Methoden zum Tauschen der Zeitfenster detailliert zu untersuchen. Um die komplexen Abläufe zwischen den Beteiligten im Hafen abbilden zu können, wird ein ereignisorientiertes, diskretes Simulationsmodell verwendet.

In Kapitel 2 wird zunächst der aktuelle Stand der Forschung zu TAS und Umfuhren kurz vorgestellt. In Kapitel 3 werden der Aufbau der Simulationsstudie, die notwendigen Annahmen und der Buchungsvorgang beschrieben. In Kapitel 4 werden die Experimente und ihre Ergebnisse dargestellt. Abschließend werden in Kapitel 5 das Fazit und Vorschläge für aufbauende Forschungsarbeiten gegeben.

2 Stand der Forschung

Der Fokus relevanter Studien zu TAS an CT liegt zumeist auf der Reduzierung der Warteschlangen am Gate und der Prozessoptimierung im Yard. Beispiele dafür sind die Veröffentlichungen von Guan und Liu (2009) und Zhao und Goodchild (2013). Li et al. (2016) untersuchen darauf aufbauend, wie ein TAS auf CT gestaltet sein muss, um bei Störungen, wie z. B. nicht eingehaltenen Zeitfenstern, weniger anfällig zu sein.

Der Einfluss von TAS auf Fuhrunternehmen wird seltener betrachtet (Lange et al., 2017). Bisherige Studien in diesem Bereich beschränken sich in der Regel darauf, entweder den Buchungsprozess der Zeitfenster bei TAS oder die Zuordnung der Lkw zu den Aufträgen mit Zeitfenster zu optimieren. Namboothiri und Erera (2008) ermitteln die optimale Auftragsreihenfolge für eine Flotte von Lkw, um die Transportkosten zu reduzieren. Shiri und Huynh (2016) verwenden eine Tabu Search Methode für die Zuweisung von Lkw eines Fuhrunternehmens zu den vorhandenen Aufträgen, so dass die Lkw-Gesamtbetriebsdauer minimiert wird. Caballini et al. (2016) entwickeln ein mathematisches Modell, welches die Zeitfenster so bucht, dass ein festgesetzter Servicelevel für die Fuhrunternehmen eingehalten und gleichzeitig der Stau auf dem Terminalgelände reduziert wird. Das Einsparpotenzial an Emissionen und Kosten, das sich durch die Kollaboration der Fuhrunternehmen ergibt, wird in Schulte et al. (2015) mittels eines Simulationsmodells und in Schulte et al. (2017) durch ein Optimierungsmodell analysiert. Phan und Kim (2015) und

Azab et al. (2018) betrachten ein verhandlungsbasiertes TAS zwischen CT und Fuhrunternehmen. Während Phan und Kim (2015) ein mathematisches Modell erstellen, verknüpfen Azab et al. (2018) Simulation und Optimierung zur möglichst realistischen Abbildung.

Wird der Betrachtungsrahmen erweitert, so kann das hier zu untersuchende Problem als ein dynamisches Full Truckload Pickup and Delivery Problem (DFTP&DVRP, vgl. (Zäpfel und Vogl, 2010)) mit Zeitfensterrestriktionen angesehen werden. Dies bedeutet, dass die Fahrzeugkapazität durch eine einzige Lieferung ausgelastet ist und der Disponent erst nach vollendeter Zustellung des vorherigen Auftrags über die Durchführung eines Folgeauftrags entscheiden muss. Das Standardproblem der Tourenplanung fällt bereits in die Klasse der NP-schweren Probleme. Die Berücksichtigung der Dynamik sowie zusätzlicher problemspezifischer Restriktionen bewirken zudem eine signifikante Steigerung der Komplexität des Planungsproblems. In diesem Beitrag werden daher keine exakten Vorgehensweisen betrachtet.

Hier soll daher eine rein ereignisorientierte Tourenplanung mit Schwerpunkt auf der Steuerung der Fahrzeuge Anwendung finden, wobei die Zuteilung von offenen Aufträgen auf die Fahrzeuge überwiegend mithilfe von Prioritätsregeln erfolgt (Zäpfel und Vogl, 2010). Häufig genannt werden in diesem Zusammenhang auf der Warteschlangentheorie basierende Entscheidungsstrategien wie First Come – First Served, Partitioning, Stochastic Queue Median und Nearest Neighbor, welche jedoch nicht den problemabhängigen Einschränkungen gerecht werden. Es konnte kein Ansatz aus der Literatur direkt auf das Problem übertragen werden. Daher wurden neue heuristische Algorithmen entwickelt, um Lösungen für den spezifischen Problemfall zu finden, ohne dabei optimale Lösungen anzustreben. Dieser Ansatz ist auch dadurch motiviert, dass viele Arbeiten mit genaueren Lösungsverfahren nur für kleinere Problemfälle erarbeitet wurden und dynamische Anpassungen im Hamburger Hafen ggf. eine Vielzahl an Lkw und Aufträgen berücksichtigen müssen. Zudem soll das Verfahren in dynamischen Planungssituationen in der Lage sein, Lösungen innerhalb weniger Sekunden zu generieren. Problemspezifische Heuristiken sind Verfahren, welche für ein Optimierungsproblem anhand problemspezifischer Regeln mit geringem Rechenaufwand eine gute Lösung berechnen.

3 Aufbau der Simulationsstudie

Um das Potenzial des Zeitfenstertauschs für Fuhrunternehmen zu bestimmen, wird ein ereignisorientiertes diskretes Simulationsmodell mit Tecnomatix Plant Simulation Version 14.2 erstellt. Das Simulationsmodell basiert auf Daten von Unternehmen aus dem Hamburger Hafen. Es werden neben vier CT und einem Fuhrunternehmen 17 weitere logistische Knoten wie Packstationen und Leercontainerdepots dargestellt. Die Fahrwege zwischen den Anfahrpunkten sind vereinfacht als Verweilzeiten in Modellbausteinen auf Basis dynamischer Fahrtzeiten-Matrizen abgebildet. An den logistischen Knoten und Terminals werden nur die landseitigen Prozesse mit direkter Relevanz für die Lkw-Abfertigung berücksichtigt. Zur Abbildung der Tauschoption werden ausgewählte Algorithmen modular in das Modell integriert.

Bei den Simulationsexperimenten soll u. a. festgestellt werden, ob das Tauschen bei einer größeren Auswahl an verfügbaren Zeitfenstern eines großen Fuhrunternehmens einen höheren Einfluss auf die Produktivität als bei kleineren Unternehmen hat. Die

Produktivität wird hierbei u. a. durch die Anzahl an abgeschlossenen Aufträgen pro Lkw und die benötigte Fahrzeit für Leerfahrten ausgedrückt.

Folgende Annahmen werden für das Simulationsmodell getroffen:

- Das Simulationsmodell ist auf den Bereich des Hamburger Hafens begrenzt.
- Ein Simulationslauf umfasst ein bis drei Schichten, wobei alle erforderlichen Buchungen im TAS zu Beginn jedes Laufes getätigt werden.
- Transportaufträge gebuchter Zeitfenster können (auch kurzfristig) getauscht, aber nicht storniert und neu gebucht oder anderen Zeitfenstern hinzugefügt werden.
- Ein Transportauftrag besteht aus dem Abholen und Ausliefern eines Containers.
- Die Routenzeiten sind durch gesetzliche Lenkpausen und Schichtzeiten begrenzt, für die der Lkw zum Depot fahren muss.

Online stehen den Fuhrunternehmen Informationen zur aktuellen Verkehrslage im Hafen und Daten zur Auslastung der am TAS teilnehmenden CT zur Verfügung, welche u. a. Aussagen über voraussichtliche und auslastungsabhängige Toleranzbereiche für die Abfertigung bei Ankunft außerhalb des gebuchten Zeitfensters zulassen. Um die Variation der Inputdaten im Laufe des Tourenausführungsprozesses adäquat darzustellen und Verfahren zur dynamischen Anpassung zu prüfen, ist die Analyse der dynamischen Parameter der Fahrzeiten (1) und der Kapazitätsauslastungen an den CT (2) wesentlich.

1. Gerade bei Planungsproblemen mit Zeitfenstern ist es häufig sinnvoller, Distanzen mit der Fahrzeit anstatt der Strecke zu bewerten (Fleischmann et al., 2004). Änderungen der Reisezeiten aufgrund von z. T. unvorhersehbarer Ereignisse wie Unfällen, die zu einer Aktualisierung der Reisezeitprognose führen, stehen über Online-Dienste zeitnah zur Verfügung. Um die Fahrzeit auf der empfohlenen Route zwischen Start- und Zielort zu bestimmen, kann die von Google Maps bereitgestellte API Distance Matrix herangezogen werden. Weiterhin können tageszeitabhängige Verteilungen zu realistischen prozentualen Abweichungen der Schätzung bei guter bzw. schlechter Verkehrslage erstellt werden.
2. Die zu buchenden Zeitfenster im TAS des Hamburger Hafens umfassen mindestens eine volle Stunde mit einer Toleranz von +/- 30 Minuten. Bei einer Abweichung von bis zu +/- 90 Minuten zum gebuchten Zeitfenster kann die Abfertigung nicht garantiert werden und erfolgt nur sofern die Auslastung des Terminals dies zulässt. Zur Darstellung dynamischer Toleranzen der Zeitfenster im Tagesverlauf ist daher eine Analyse der Zeitfensterauslastung (Analysezeitraum KW 13 bis KW 16 2019) notwendig.

Ein Simulationslauf gliedert sich in zwei Teile: die Auftragsdatengenerierung und die dynamische Tourenplanung. Jeder Auftrag verfügt über eine Quelle und eine Senke. Für die Annahme der Struktur des Transportaufkommens (20 Prozent Umfahren zwischen CT, 60 Prozent zwischen CT und andersartigen Logistikknoten sowie 20 Prozent zwischen andersartigen Logistikknoten) wurden Daten eines mittelständischen Hamburger Unternehmens herangezogen. Wenn Quelle und Senke CT sind, werden jeweils die gleichen oder aufeinander folgende Zeitfenster gebucht. Zudem sind die Öffnungszeiten der Akteure sowie die Arbeitszeiten des Fuhrunternehmens bei den Buchungen zu berücksichtigen. Die schwankende Arbeitsbelastung eines Fuhrunternehmens im Tagesverlauf wird in die Auftragsdatengenerierung einbezogen. Dazu wird die durchschnittliche Auslastung der Zeitfenster je Terminal analysiert. Es wird angenommen, dass stärker

nachgefragte und daher als präferiert angenommene Zeitfenster mit einer höheren Wahrscheinlichkeit gebucht werden. Die Kapazität jedes Zeitfensters ist begrenzt.

Die dynamische Fahrzeugführung erfolgt im Simulationsmodell. Die Transportaufträge werden in einer Liste gespeichert und unter der Anwendung einer auszuwählenden Strategie abgearbeitet. Die Auftragszuweisung wird fahrzeuginitiert am Schichtanfang, nach einem Wartevorgang auf passende Aufträge oder einer Pause am Depot sowie wenn ein Auftrag abgeschlossen oder abgebrochen wurde durchgeführt. Der Ablauf der Zuweisung von Aufträgen zu Fahrzeugen, siehe Abbildung 1, orientiert sich an der Darstellung von Fleischmann et al. (2004).

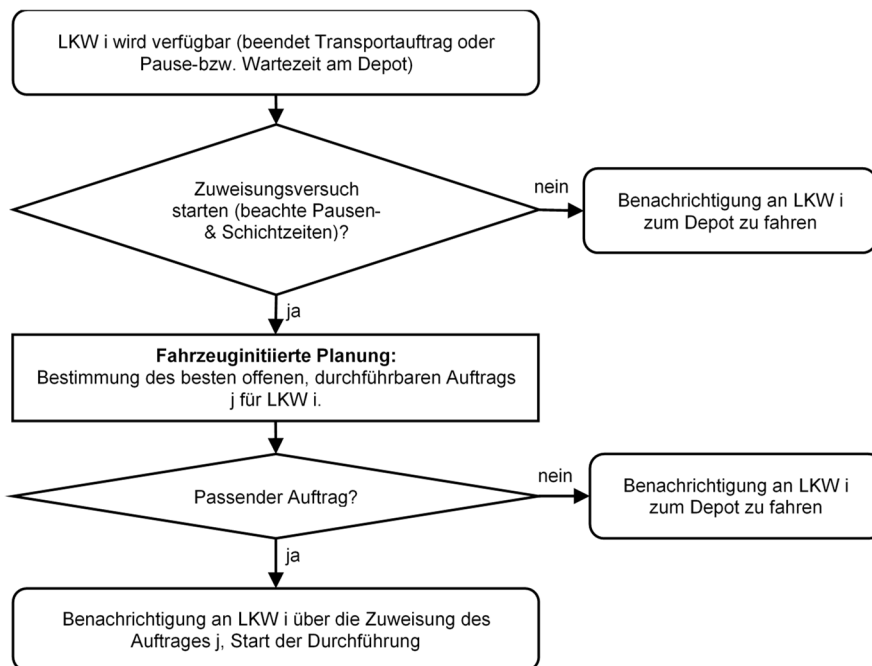


Abbildung 1: Schematisches Ablaufdiagramm der fahrzeuginitierten Zuweisung

Zunächst wird geprüft, ob eine neue Auftragszuweisung mit den Schichtzeiten des Fahrers kompatibel ist. Falls nicht, begibt sich dieser zum Depot. Ansonsten werden alle nicht zugeordneten Aufträge bezüglich ihrer Dringlichkeit bewertet. Diese ergibt sich aus Öffnungs- und Schließzeiten bzw. gebuchten Zeitfenstern von Quelle und Senke im Vergleich zur aktuellen Simulationszeit. Die Methode prüft zusätzlich anhand der aktuellen und tageszeitabhängigen prognostizierten Verkehrslage im Hafen und der aktuellen und prognostizierten Möglichkeit der Abfertigung an den Terminals sowie aufgrund von Erfahrungswerten zur Dauer der Abfertigung, ob ein Transportvorhaben durchführbar ist. Bei durchführbaren Aufträgen mit gleicher Dringlichkeit ist die notwendige Fahrdauer zur Quelle entscheidend.

Nach erfolgreicher Bestimmung des besten, offenen und durchführbaren Auftrags wird dieser im Grundmodell dem Lkw zugewiesen. Ist die Tauschoption aktiviert, so wird dieser Auftrag vorerst nur als vorgemerkt markiert. Anschließend wird für die

Quelle des Auftrags geprüft, ob diese als Quelle weiterer offener und tauschbarer Aufträge angegeben ist. Alle alternativen Aufträge samt prognostizierter Ankunftszeit an der alternativen Senke werden in einer Tabelle notiert. Wenn es sich bei der Senke um ein CT handelt, so wird bestimmt welches Zeitfenster zugewiesen werden müsste, sodass der Lkw innerhalb des Toleranzbereichs ankäme. Andersartige Logistikknoten werden nur berücksichtigt, sofern die Ankunftszeit innerhalb der Öffnungszeiten liegt.

Im nächsten Schritt wird prognostiziert, wann der Auftrag an der Senke abgeschlossen sein wird und ob ein direkter Folgeauftrag zugewiesen werden kann. Dafür werden Dringlichkeit und Fahrtdauer zur Quelle bestimmt. Diese Bewertung des Nachfolgers ist für die Tauschwahl entscheidend. Analog zum Grundmodell wird stets geprüft, ob die Zeitbeschränkungen an den Anfahrpunkten eingehalten werden können. Es wird der beste Folgeauftrag für den Lkw reserviert, wobei die benötigten Tausche der beteiligten Zeitfenster durchführbar sein müssen. Im einfachsten Fall werden nur die Zeitfenster der Buchungen für die Quelle des Auftrags getauscht. Dies ist der Fall, wenn die Senken jeweils keine Buchung benötigen und innerhalb der Öffnungszeiten erreicht werden können. Falls eine Senke eine Buchung benötigt, dann ist ein weiterer Transportauftrag in dem Tauschvorhaben zu berücksichtigen. Falls kein effizienter Tausch möglich ist, ist der ursprüngliche Auftrag auszuwählen. Verpasste Zeitfenster oder Ankünfte nach Schließzeit der Knoten sind möglich. Kommt der Lkw außerhalb der Toleranz an, hängt die erfolgreiche Abwicklung von der tageszeitabhängigen Auslastung und der Möglichkeit der erweiterten Abfertigung des CT ab.

4 Ergebnisauswertung

Die hier geschilderten Ergebnisse stellen die Grundlage für geplante, umfangreichere Experimente dar. Sie werden u. a. dazu genutzt, das Modell zu validieren und erste Erkenntnisse bezüglich des Einflusses des Tauschverhaltens zu gewinnen. Aus diesem Grund liegt im folgenden Kapitel neben der Darstellung der Ergebnisse ein Schwerpunkt auf der Verdeutlichung der bisherigen Limitationen. Geplante Anpassungen des Modells und weitere Untersuchungsschwerpunkte werden in Kapitel 5 beschrieben. Eine Übersicht über die Experimente dieser Untersuchung ist im Experimentplan in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Experimentplan mit relevanten Parametern

Exp.	Schichten	Fahrer gesamt	Lkw pro Schicht	Aufträge
1	1	10	10	65
2	2	10	5	65
3	1	30	30	195
4	2	30	15	195
5	3	30	Früh.:15, Spät.:12., Nacht.:3	195
6	2	50	25	325
7	3	50	Früh.:25, Spät.:20., Nacht.:5	325

Bei den sieben durchgeführten Experimenten werden die Schichtanzahl, die Anzahl der Fahrer über alle Schichten, die Lkw pro Schicht und die Anzahl der Aufträge

variiert. Bei den Schichtmodellen wird zwischen einem Drei-Schicht-Modell (6 bis 14 Uhr, 14 bis 22 Uhr und 22 bis 6 Uhr), einem Zwei-Schicht-Modell (5 bis 13 Uhr und 13 bis 21 Uhr) und einem Ein-Schicht-Modell (8 bis 16 Uhr) unterschieden. Die Gesamtanzahl der Fahrer teilt sich auf die Lkw der verschiedenen Schichten auf. Das Transportaufkommen ist abhängig von der Anzahl der Fahrer: es wird angenommen, dass ein Fuhrunternehmen nur Aufträge bis zum Erreichen seiner Kapazitätsgrenze annimmt. Weiterhin wird bei jedem Experiment zwischen drei Einstellungen für das Tauschen (Grundmodell ohne Tauschen, Minimierung der Leerfahrten und Maximierung der Auftragsbefriedigung) unterschieden. In Abbildung 2 sind die durchschnittlich abgeschlossenen Aufträge pro Lkw und Schicht dargestellt.

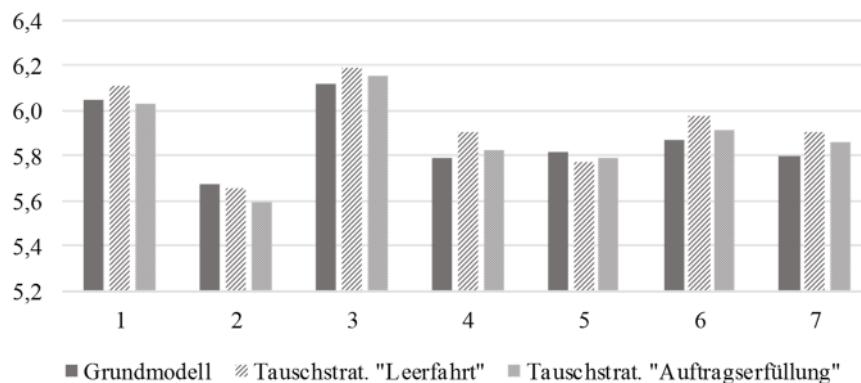


Abbildung 2: Durchschnittlich abgeschlossene Aufträge pro Lkw und Schicht

Bei den angenommenen Parametereinstellungen zeigen die untersuchten Tausch-Algorithmus im Vergleich zum Grundmodell keine bedeutende Steigerung der Lösungsqualität hinsichtlich der erfüllten Aufträge. Dies kann u. a. damit begründet werden, dass im Modell von einer 90 prozentigen Auftragsbefriedigung ausgegangen wird. Das heißt, dass so viele Aufträge vorliegen, dass 10% in den nächsten Tag verschoben werden müssen. Dadurch können problematische Aufträge umgangen werden, ohne einen Einfluss auf das Ergebnis zu haben. Realistischer wäre eine Quote von 95 Prozent. Nach einer entsprechenden Anpassung kann mit einem Anstieg des Einflusses der Tauschoption ausgegangen werden. An den vorliegenden Ergebnissen kann jedoch gezeigt werden, dass die Tauschstrategie „Leerfahrt“ einen positiveren Einfluss auf die Auftragsbefriedigung hat als die Strategie „Auftragsbefriedigung“. Eine reine Konzentration auf die Dringlichkeit ist demnach nicht empfehlenswert. Um diesen Sachverhalt weiter zu untersuchen, wurde in Abbildung 3 der Anteil der durchgeführten Tauschvorgänge der abgeschlossenen Aufträgen betrachtet.

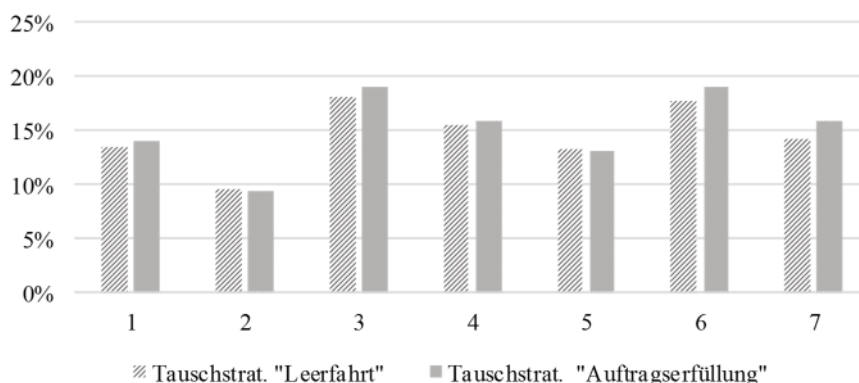


Abbildung 3: Anteil durchgeführte Tauschvorgänge der durchgeführten Aufträge

Es wird deutlich, dass bei der Tauschstrategie „Auftragserfüllung“ zwar mehr Tauschvorgänge durchgeführt werden als bei der Tauschstrategie „Leerfahrt“, dies aber nicht zur Erhöhung der Anzahl der abgeschlossenen Aufträge (Abb. 2) beiträgt. Dies kann daran liegen, dass das Tauschvorhaben fahrzeuginitiiert ist und nur für den Lkw zu dem diskreten Zeitpunkt die besten Folgeaufträge bestimmt. Es wird nicht berücksichtigt, ob dadurch die Tourendurchführung im späteren Verlauf ggf. suboptimal gestaltet wird. Abschließend ist in Abbildung 4 der Anteil der Leerfahrten bei dem Grundmodell im Vergleich zur Tauschstrategie „Leerfahrt“ dargestellt. Es ist dabei zu beachten, dass im Modell jeweils mindestens zwei Leerfahrten vom Depot aus zu einer Quelle getätigt werden müssen (Schichtbeginn und nach Pausen).

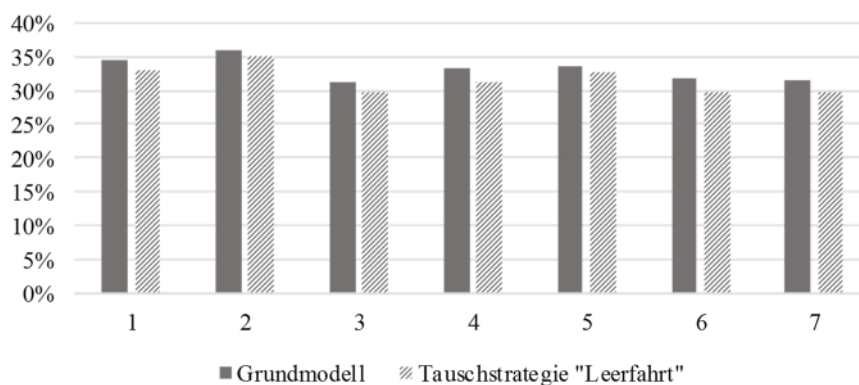


Abbildung 4: Anteil der Leerfahrten zu Quellen an der Gesamtfahrtzeit

Es ist erkennbar, dass insbesondere bei den Experimenten mit einer hohen Anzahl an Fahrern pro Schicht (Experiment 3 und 6) eine Reduzierung des Leerfahrtanteils vorliegt. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass eine hohe Anzahl an Fahrern pro Schicht und dementsprechend eine große Anzahl an Aufträgen die Flexibilität bei der Verwendung eines Tauschalgorithmus erhöht. Diese Flexibilität ist

insbesondere dann positiv zu beurteilen, wenn ein Fuhrunternehmen einen Tausch durchführt, um beispielsweise auf kurzfristige Kundenwünsche zu reagieren. Dann kann ohne Einbußen in der Performance die Kundenzufriedenheit erhöht werden. Dahingehend ist aufgrund der Anzahl durchgeführter Tauschvorhaben zu erkennen, dass große Unternehmen in dieser Hinsicht einen Vorteil gegenüber kleineren Unternehmen haben. Allerdings sind die Verbesserungen deutlich geringer als erwartet. Dies kann bei der Betrachtung der Leerfahrten insbesondere darauf zurückgeführt werden, dass bei der Pause eine Rückkehr ins Depot des Fuhrunternehmens angenommen wurde. Nach Rücksprache mit Experten aus der Praxis kann davon ausgegangen werden, dass die Lkw-Fahrer ihre Pause so verbringen, dass wenn möglich keine Leerfahrten entstehen. Nach Anpassung dieser Annahme werden deutlich größere Reduzierungen beim Leerfahrtenanteil erwartet. Weiterhin wurde bisher davon ausgegangen, dass bei einer Umfuhr zwischen CT bei der Senke, bei ausreichender Kapazität, immer ein passendes Zeitfenster zur Verfügung steht. Als passend wird ein Zeitfenster angenommen, das gleichzeitig oder maximal um eine Stunde verzögert zum Zeitfenster der Quelle liegt. Aufgrund der hohen Auslastung der Terminals zu Peak-Zeiten kann diese Annahme als zu optimistisch bewertet werden. Bei weiterführenden Untersuchungen soll berücksichtigt werden, dass durch die Auslastung der Zeitfenster ggf. auch erst spätere Zeitfenster bei der Senke zur Verfügung stehen. Es ist zu erwarten, dass dadurch der Einfluss des Tauschens weiter steigt.

5 Fazit und Ausblick

Diese Simulationsstudie untersucht den Einfluss einer gezielten Tauschoption bei Aufträgen von Fuhrunternehmen unterschiedlicher Größe. Dabei wird zunächst die Hypothese aufgestellt, dass große Fuhrunternehmen mit vielen Fahrern pro Schicht einen Vorteil gegenüber kleineren Unternehmen haben. Dies kann durch die Ergebnisse der Simulationsstudie bestätigt werden. Weiterhin werden zwei unterschiedliche Tauschstrategien verglichen. Die Tauschstrategie „Leerfahrt“ kann gegenüber der Strategie „Auftragserfüllung“ sowohl bezüglich der Auftragserfüllungsquote als auch der Leerfahrten als positiver bewertet werden. Trotzdem ist der Einfluss der Tauschmöglichkeit deutlich geringer, als ursprünglich angenommen wurde. Dies liegt teilweise an Annahmen im Simulationsmodell. Die Untersuchung hat ergeben, dass diese noch zu weit von der Realität abweichen und entsprechend angepasst werden müssen. Dazu zählen insbesondere die Buchung von Zeitfenster bei Transporten zwischen CT, die geplante Auftragserfüllungsquote und die Pausenregelung. Nach Anpassung dieser Annahmen kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss des Tauschens sich deutlich erhöht.

Darauf aufbauend kann das Simulationsmodell genutzt werden, um weitere Faktoren und deren Einflüsse auf das Tauschen zu betrachten. Dazu zählen u. a. die Struktur des Transportaufkommens und die Auslastung der Ressourcen der Fuhrunternehmen und der logistischen Knoten und Terminals. Zusätzlich können die bestehenden Algorithmen weiterentwickelt bzw. neue untersucht werden. Weiterhin können neben den reinen Tauschvorgängen ebenfalls das Stornieren und Umbuchen bzw. das Zubuchen untersucht werden, die in der Praxis weit verbreitet sind. Zusätzlich sollte analysiert werden, inwieweit die Alternativen kombiniert angewandt werden können.

Literatur

- Azab, A.; Karam, A.; Eltawil, A.: Impact of Collaborative External Truck Scheduling on Yard Efficiency in Container Terminals. In: Parlier, G.H.; Liberatore, F.; Demange, M. (Hrsg.): *Operations Research and Enterprise Systems*. Cham: Springer International Publishing 2018, S. 105–128.
- Caballini, C.; Sacone, S.; Saeednia, M.: Cooperation among truck carriers in seaport containerized transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 93 (2016), S. 38–56.
- Fleischmann, B.; Gnutzmann, S.; Sandvoß, E.: Dynamic Vehicle Routing Based on Online Traffic Information. *Transportation Science* 38 (2004) 4, S. 420–433.
- Guan, C.; Liu, R.: Container terminal gate appointment system optimization. *Maritime Economics & Logistics* 11 (2009) 4, S. 378–398.
- Huynh, N.; Smith, D.; Harder, F.: Truck Appointment Systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2548 (2016), S. 1–9.
- Lange, A.-K.; Schwientek, A.; Jahn, C.: Reducing truck congestion at ports – classification and trends. In: Jahn, C.; Kersten, W.; Ringle, C.M. (Hrsg.): *Digitalization in maritime and sustainable logistics*, 2017, S. 37–58.
- Li, N.; Chen, G.; Govindan, K.; Jin, Z.: Disruption management for truck appointment system at a container terminal: A green initiative. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* (2016), S. 261–273.
- Namboothiri, R.; Erera, A.L.: Planning local container drayage operations given a port access appointment system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 44 (2008) 2, S. 185–202.
- Phan, M.-H.; Kim, K.H.: Negotiating truck arrival times among trucking companies and a container terminal. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 75 (2015), S. 132–144.
- Schulte, F.; González, R.G.; Voß, S.: Reducing Port-Related Truck Emissions: Coordinated Truck Appointments to Reduce Empty Truck Trips. In: Corman, F.; Voß, S.; Negenborn, R.R. (Hrsg.): *Computational Logistics*. Cham: Springer International Publishing 2015, S. 495–509.
- Schulte, F.; Lalla-Ruiz, E.; González-Ramírez, R.G.; Voß, S.: Reducing port-related empty truck emissions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 105 (2017), S. 195–212.
- Shiri, S.; Huynh, N.: Optimization of drayage operations with time-window constraints. *International Journal of Production Economics* 176 (2016), S. 7–20.
- UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT: *Review of maritime transport 2018: UNITED NATIONS* 2019.
- Zäpfel, G.; Vogl, P.: *Dynamisch-adaptive Tourenplanung*. Linz, Donau: Trauner 2010.
- Zhao, W.; Goodchild, A.V.: Using the truck appointment system to improve yard efficiency in container terminals. *Maritime Economics & Logistics* 15 (2013) 1, S. 101–119.