

Einsatzplanung in Fahrerlosen Transportsystemen unter Berücksichtigung von Ladungsträgertransfers

Task Assignment in Automated Guided Vehicle Systems considering Transport Load Transfers

*Patrick Boden
Sebastian Rank
Thorsten Schmidt*

*Professur für Technische Logistik
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Fakultät Maschinenwesen
Technische Universität Dresden*

Der Beitrag beschreibt ein neuartiges Konzept zur Einsatzplanung Fahrerloser Transportsysteme. Es ermöglicht den gegenseitigen Austausch von Ladungsträgern zwischen den Fahrzeugen an definierten Transferpunkten während der Transportausführung. Transfers werden ad-hoc unter Berücksichtigung des Systemzustandes geplant.

Zur Berechnung der Einsatzpläne werden verschiedene Lösungsverfahren vorgestellt. Diese werden anhand von Testinstanzen und einer Materialflusssimulation diskutiert. Im Ergebnis wird gezeigt, dass Verbesserungen bezüglich der Kosten für Fahrt und Lastwechsel zur Ausführung von Einsatzplänen und damit verbunden auf die Fahrzeugauslastung erzielt werden können.

[Schlüsselwörter: Fahrerloses Transportsystem, Steuerung, Einsatzplanung, Transfers, Pickup und Delivery Problem mit Transfers]

The paper describes a novel concept for the task assignment of Automated Guided Vehicles. It enables the transfer of transport loads between vehicles at defined transfer stations during transport execution. Transfers are planned ad-hoc considering the current system status.

For the computation of schedules different solution methods are presented and discussed based on test instances and a material flow simulation. As a result, it is shown that improvements can be achieved in respect to costs for driving and handling to realize schedules and thus to vehicle utilization.

[Keywords: Automated Guided Vehicles, Control, Task Assignment, Transfers, Pickup and Delivery Problem with Transfers]

1 EINLEITUNG

Bisher erfolgt die Steuerung Fahrerloser Transportsysteme (FTS) in der Regel unter der Annahme, dass ein einzelnes Fahrzeug einen gesamten Transportauftrag ausführt. Gleichwohl zeigen Anwendungen aus der Distributionslogistik oder dem Personenverkehr (siehe [1], [2]), dass durch einen gegenseitigen (Ladungsträger-)Austausch eine Flexibilitätssteigerung und so eine höhere Effizienz ermöglicht werden.

Im Rahmen intralogistischer Aufgaben ist dagegen offen, wie eine Steuerung unter Berücksichtigung von Ladungsträgertransfers für FTS ermöglicht werden kann und welche Potenziale und Grenzen damit einhergehen. Ziel der Untersuchung ist es, die Steuerungsaufgabe zu beschreiben, Berechnungsverfahren zur Generierung von Einsatzplänen zu evaluieren und anhand von Experimenten verallgemeinerbare Aussagen zum Einsatz für FTS zu treffen.

Anhand einer systematischen Literaturrecherche wurden Ansätze und Lösungsverfahren zur Steuerung fahrzeugbasierter Transportsysteme allgemein und unter Berücksichtigung von Transfers erfasst. Diese wurden hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf FTS bewertet. Zur Generierung von Einsatzplänen wurden ein exaktes und zwei heuristische Lösungsverfahren adaptiert und implementiert. Ihre Evaluierung erfolgte anhand von Testinstanzen und einer Materialflusssimulationsstudie.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Literaturrecherche, das Konzept von Ladungsträgertransfers und die Ansätze zur Berechnung entsprechender Einsatzpläne beschrieben. Darauf aufbauend werden die Potenziale und Grenzen anhand der Ergebnisse von Experimenten mit Testinstanzen und einer Materialflusssimulationsstudie diskutiert.

2 STAND DER TECHNIK

Der dynamische Austausch von Ladungsträgern wird für die Einsatzplanung von FTS im Kontext der Intralogistik weitestgehend vernachlässigt. In der Literatur werden bisher weder das Konzept noch passende Lösungsverfahren zur Berechnung der für die Steuerung notwendigen Einsatzpläne beschrieben. Damit bleibt offen, ob und wie die für andere Anwendungsgebiete diskutierten Vorteile auch für FTS realisiert werden können.

Im Folgenden werden Aspekte der Einsatzplanung von FTS beschrieben. Anschließend werden Ansätze zur Berücksichtigung von Transfers und die potenziell mit ihrem Einsatz verbundenen Potenziale und Grenzen diskutiert.

2.1 EINSATZPLANUNG VON FTS

Die Einsatzplanung ist essenziell zur Steuerung Fahrerloser Transportsysteme. Mit ihr wird festgelegt, wie Transportaufträge (bestehend aus Lastaufnahme/-abgabe) den Fahrzeugen eines FTS zugeordnet werden und wie mit Leerfahrzeugen umzugehen ist (vergl. [3]). Neben der Zuordnung der Transportaufträge zu den Fahrzeugen wird die Reihenfolge der Abarbeitung determiniert. Hierfür sind die Charakteristik des Transportsystems (z. B. Geschwindigkeit der Fahrzeuge) und die Anforderungen des Logistiksystems (z. B. Termintreue) zu berücksichtigen.

Nach De Ryck et al. (2020) werden FTS vorrangig von einer zentralen Steuerungseinheit aus koordiniert, welche kontinuierlich mit den Fahrzeugen kommuniziert (siehe [4]). Damit ist es möglich, aktuelle Informationen (z. B. Fahrzeugpositionen) für die Generierung von Steuerungsentscheidungen zu berücksichtigen. Gleichzeitig ist die zentrale Steuerung anspruchsvoll, da zahlreiche Entitäten zu berücksichtigen sind und durch die Stochastik des Systems (z. B. Fahrzeugausfälle) Echtzeitanforderungen zu erfüllen sind. Hierfür müssen Steuerungsentscheidungen in einer definierten Zeit erzeugt werden, wofür in der Regel nur wenige Sekunden zur Verfügung stehen.

Um Einsatzpläne zu berechnen, können mathematische Modelle eingesetzt werden (vergl. [5]). Diese beschreiben das zu optimierende Ziel und die zu berücksichtigenden Restriktionen. Sie erlauben es Algorithmen anzuwenden, welche die Berechnung optimaler Lösungen ermöglichen (z. B. durch *Branch-and-Bound-Verfahren*).

Speziell für die Einsatzplanung von FTS könnte das Modell des *Pickup and Delivery Problems* (PDP) herangezogen werden. Es gilt jedoch als NP-schwer und kann damit nicht effizient gelöst werden (siehe [6]), womit bereits für wenige Fahrzeuge eine Steuerung in Echtzeit praktisch ausgeschlossen ist. Daher werden Heuristiken notwendig.

Heuristiken zur Einsatzplanung können grob in zwei Gruppen unterschieden werden: jene, die einen vollständi-

gen Plan unter Berücksichtigung aller ausstehenden Aufträge generieren, und solche, die lediglich begrenzt Transportaktionen (z. B. die nächste Lastaufnahme) heranziehen. Zur Generierung vollständiger Pläne werden dann vorrangig *Metaheuristiken* eingesetzt (z. B. *Simulated Annealing*). Diese erlauben eine hohe Lösungsqualität bei geringer Problemgröße (wenige Fahrzeuge und Aufträge, vergl. [7], [8]). Da die Berücksichtigung von Transfers die Berechnung erschwert, ist zu erwarten, dass sie lediglich für kleine FTS eingesetzt werden können.

Dagegen können Heuristiken zur Auswahl einzelner Transportaktionen auch für große Fahrzeugflotten angewendet werden. Sie nutzen Kriterien, die schnell zu evaluieren sind. Egbelu und Tanchoco (1984) kommen bspw. zum Ergebnis, dass durch die richtige Priorisierung basierend auf der Distanz zwischen Fahrzeug und Lastwechselstation performante Ergebnisse erzielt werden können (vergl. [9]). Ho und Chien (2006) erweitern diesen Ansatz für die Steuerung von Fahrzeugen mit Mehrfachlastaufnahme (siehe [10]). So kann bspw. durch die Bevorzugung der Lastaufnahme mit dem Ansatz *Pickup First – Shortest Distance (PFSD)* Nutzen aus der zusätzlichen Kapazität gezogen werden. Mit solchen Heuristiken könnte auch eine Einsatzplanung mit Transfers für größere Fahrzeugsysteme möglich sein.

Für die Einsatzplanung von FTS in der Intralogistik wurden bisher weder exakte noch heuristische Lösungsverfahren unter Berücksichtigung von Transfers untersucht. Synergieeffekte zwischen den Fahrzeugen eines FTS (z. B. ähnliches Ziel von Transportaufträgen) und dadurch erwartete Effizienzgewinne motivieren aber zur Adaption.

2.2 EINSATZPLANUNG MIT TRANSFERS

In ähnlichen Einsatzgebieten, wie dem Passagiertransport oder Kurierdiensten, werden Transfers in der wissenschaftlichen Literatur und der praktischen Anwendung zunehmend untersucht. Obwohl sich diese Systeme wesentlich zu FTS unterscheiden können sie dennoch zeigen, wie Einsatzpläne berechnet werden und welche Potenziale und Grenzen resultieren.

Um Einsatzpläne unter Berücksichtigung von Transfers zu generieren, beziehen sich die Autoren regelmäßig auf eine Erweiterung des PDP, das *Pickup and Delivery Problem with Transfers* (PDP-T). Es kann den Arbeiten [11] und [12] entnommen werden. Cortés et al. (2010) nutzen einen Branch-and-Bound-Algorithmus, um optimale Ablaufpläne für ein Personentransportsystem zu berechnen (vergl. [11]). Für ein System aus zwei Fahrzeugen werden bereits mehrere Minuten benötigt. Damit ist der Ansatz für eine Echtzeitsteuerung von FTS nicht geeignet. Dennoch können die Ergebnisse für ein offline-Planungsszenario oder als Referenz für die Bewertung heuristischer Verfahren relevant sein.

Die Metaheuristik *Adaptive Large Neighborhood Search* wird in [13] und [14] zur Einsatzplanung unter Berücksichtigung von Transfers eingesetzt. Sie wird im Folgenden als *Adaptive Large Neighborhood Search with Transfers* (ALNS-T) bezeichnet. Masson et al. (2013) untersuchen für ein Personentransportsystem Testinstanzen mit bis zu 8 Fahrzeugen und 96 Transportaufträgen (vergl. [14]). Dafür wurde ein Zeitlimit für die Berechnung von 10 Stunden gesetzt. Im Vergleich zu Lösungen ohne Transfers konnten sie die Kosten zur Ausführung (für Fahrt und Be-/Entladung) um bis zu 9,7 % und 3,5 % im Mittel senken. Petersen und Ropke (2011) untersuchen ein Szenario der Distributionslogistik (in Anlehnung an ein *Hub-and-Spoke-System*) für mehrere Hundert Transportaufträge und einem Zeitlimit von 90 Minuten zur Berechnung des Einsatzplanes (vergl. [13]).

Coltin (2014) zeigt einen auktionenbasierten Steuerungsansatz für ein System mehrerer Serviceroboter und demonstriert die Möglichkeit der Realisierung von Effizienzgewinnen (in Echtzeit). Die Verbesserungen ergeben sich hauptsächlich durch Strafkosten für das Verletzen von Zeitfenstern angedachter Lastwechsel (vergl. [15]). Dieser Ansatz entspricht eher den in der wissenschaftlichen Literatur diskutierten Anforderungen eines Personentransportsystems. Für ein FTS bleibt unklar, welche Vorteile realisiert werden können.

2.3 POTENZIALE UND GRENZEN

Aus den Ergebnissen der in Abschnitt 2.2 diskutierten Arbeiten können verschiedene Erkenntnisse zu den mit Transfers verbundenen Effekten abgeleitet werden.

Zunächst gilt, dass die Lösung des PDP ebenfalls eine zulässige Lösung des PDP-T ist. Demnach sind für den Fall einer optimalen Lösung die Ergebnisse unter Berücksichtigung von Transfers mindestens so gut, wie die Ergebnisse ohne Transfers.

Diese Erkenntnis gilt nur bedingt für den Einsatz von Heuristiken, insb. im Falle begrenzter Ressourcen zur Berechnung. Die Suche von Transfers ist aufwendig und es besteht die Gefahr, dass in der zur Verfügung stehenden Berechnungszeit gute Lösungen ohne Transfers nicht identifiziert werden.

Das Maß möglicher Verbesserungen hängt wesentlich von der konkreten Planungssituation ab. Sind Restriktionen wie bspw. Zeitfenster für das Be- und Entladen zu berücksichtigen, können durch die höhere Flexibilität mit Transfers Lösungen gefunden werden, wenn eine zulässige Lösung ohne Transfers nicht möglich wäre. In Abhängigkeit der Bewertung der Verletzung einzuhaltender Nebenbedingungen, können beliebig hohe Verbesserungen evaluiert werden.

Werden lediglich die Kosten für Fahrt und Lastwechsel als Bewertungskriterium herangezogen, besteht nach Coltin

(2014) ein Potenzial zur Reduktion des Zielfunktionswertes von bis zu 50 % (siehe [15]). Experimentelle Ergebnisse von Sampaio et al. (2020) aus dem *Crowd-Source-Delivery*-Bereich bestätigen, dass in Einzelfällen Verbesserungen von bis zu 50 % erreicht werden (vergl. [16]). Auch andere Autoren zeigen anhand von Fallstudien, dass Kostensenkungen von mehr als 10 % möglich sind. Im Mittel ist die Verbesserung deutlich niedriger und liegt in einem Bereich von 1 % bis 5 % (vergl. [1], [17]–[19]). Neben den Kosten haben die Autoren gezeigt, dass die Ausführungszeit und die Anzahl notwendiger Fahrzeuge reduziert werden können.

Gleichzeitig zeigen die bisherigen Ergebnisse, dass der Nutzen von Transfers stark von der Charakteristik des Transportsystems und den konkreten Transportaufgaben abhängt (vergl. [15]). Sind bspw. die Kosten eines Lastwechsels hoch, ist es weniger wahrscheinlich, durch einen Transfer Effizienzgewinne zu erzielen.

2.4 ZWISCHENFAZIT

Die Steuerung von FTS ist aus Perspektive der Einsatzplangenerierung eine anspruchsvolle Aufgabe. Es existiert kein dominantes Verfahren, das für jede Planungsaufgabe in Echtzeit zur optimalen Lösung führt. Die Berücksichtigung von Transfers fügt einen neuen Freiheitsgrad hinzu, was die Berechnung noch aufwendiger gestaltet.

Es gilt zu untersuchen, ob positive Effekte, wie sie für alternative Transportsysteme diskutiert wurden (siehe Abschnitt 2.2 und 2.3), auch für das Einsatzgebiet FTS realisierbar sind und wie eine entsprechende Steuerung realisiert werden sollte.

Um diese Forschungslücken zu schließen, wurden ein exaktes und zwei heuristische Verfahren für die Einsatzplanung von FTS unter Berücksichtigung von Transfers ausgewählt, adaptiert und getestet. Als Referenz dienen Solver-generierte exakte Lösungen auf Basis des PDP-T. Zur Echtzeitsteuerung kleiner Fahrzeugsysteme wird die Metaheuristik ALNS-T herangezogen. Als Heuristik wird der Ansatz PDFS zur Berücksichtigung von Transfers erweitert (PFSD-T). Die Ansätze und die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert.

3 LADUNGSTRÄGERTAUSCH IN FTS: KONZEPT

Das Konzept erlaubt den gegenseitigen Austausch von Ladungsträgern zwischen den Fahrzeugen während der Transportausführung. Ein Transfer findet an definierten Transferpunkten statt. Dort können Fahrzeuge einen Ladungsträger hinterlegen, der später von einem weiteren Fahrzeug aufgenommen wird, um den Transport weiterzuführen. Auf diese Weise können Ladungsträger beliebig oft zwischen den Fahrzeugen getauscht werden. Ein direktes Treffen der Fahrzeuge ist nicht notwendig/vorgesehen.

Die Entscheidung über die Ausführung eines Transfers und die konkrete Durchführung (z. B. Wahl des Transferpunktes) werden ad-hoc in Abhängigkeit des Systemzustandes getroffen. Hier werden bspw. die Positionen der Fahrzeuge und aktuelle Transportaufträge berücksichtigt. Ein Transfer wird nur dann ausgeführt, wenn er einen Effizienzgewinn verspricht. Transferoperationen werden also nicht bereits vorab bei der initialen Definition des Transportauftrages durch übergeordnete Steuerungssysteme geplant, sondern dynamisch in Abhängigkeit des Systemzustandes.

3.1 BESCHREIBUNG MODELL

Zur Verdeutlichung des Konzepts und der Analyse des Wirkens von Ladungsträgertransfers in FTS wird ein modellbasierter Ansatz gewählt. Als Untersuchungsgegenstand dient ein FTS im Taxibetrieb, in dem eine Fahrzeugflotte Transportaufgaben ausführt und dedizierte Transferstationen zur Verfügung stehen.

Die Fahrzeuge werden durch Geschwindigkeit, Kapazität und Lastwechselzeit charakterisiert. Ein Transportauftrag besteht aus jeweils einer anzufahrenden Lastwechselstation für die Aufnahme bzw. Abgabe eines Ladungsträgers.

Transferstationen sind durch einen Ort sowie Kapazität zur Pufferung von Ladungsträgern definiert. Transferstationen können beliebig oft von den Fahrzeugen angefahren werden. Durch die Möglichkeit zur Pufferung ist ein direktes Treffen der Fahrzeuge nicht erforderlich.

Die Einsatzplanung basiert auf einer zentralen Steuerung, welcher alle relevanten Informationen zur Verfügung stehen und die kontinuierlich Steuerungsbefehle an die Fahrzeuge senden kann. Anspruch ist die Realisierung einer Einsatzplanung in Echtzeit.

3.2 GENERIERUNG VON EINSATZPLÄNEN

Zwei zentrale Probleme müssen gelöst werden, um das Konzept von Ladungsträgertransfers zu realisieren und davon zu profitieren: (1) Transferstationen müssen geeignet platziert werden und (2) Transportaufträge sind so in Teiltransporte aufzuteilen, dass Nutzen entsteht. Im Rahmen dieses Beitrages wird (2) fokussiert, um zunächst zu zeigen, dass Transfers prinzipiell einen Effizienzgewinn ermöglichen sowie vor dem Hintergrund der praktischen Anwendung die entsprechende Einsatzplanung in Echtzeit möglich ist. Bezüglich (1), der „geschickten“ Positionierung von Transferpunkten, wird lediglich ein Ausblick gegeben, wobei Voruntersuchungen bereits weiteres Verbesserungspotenzial in Aussicht stellen.

Zur Berechnung von Einsatzplänen unter Berücksichtigung von Transfers werden drei Lösungsverfahren herangezogen:

1. Exaktes Lösungsverfahren mittels Solver

2. Metaheuristik

3. Erweiterung einer Standardheuristik

Alle drei Verfahren sind relevant für die Untersuchung und den praktischen Einsatz. Das exakte Lösungsverfahren und die Metaheuristik ALNS-T werden auf die Anwendbarkeit für Offline-Planungsprobleme und zur Steuerung kleiner Fahrzeugflotten untersucht – sie erzeugen vollständige Einsatzpläne, d. h., berücksichtigen den kompletten Lösungsraum. Das Verfahren PFSD-T erzeugt nur Teilpläne, erlaubt aber aufgrund der geringeren Berechnungsressourcen die Generierung von Einsatzplänen auch für größere Systeme. In Abschnitt 4 werden die Verfahren genauer beschrieben.

3.3 EVALUIERUNG

Die Motivation zur Anwendung von Ladungsträgertransfers besteht in einer höheren Effizienz des Systems, weil Synergieeffekte bspw. durch das Zusammenlegen von Transportaufträgen mit ähnlichem Zielort genutzt werden. Diese Einsparungen sollen es ermöglichen, die Auslastung der Fahrzeuge zu senken und so einen höheren Durchsatz bzw. die Reduzierung der Fahrzeuganzahl zu ermöglichen.

Als Indikator für die Bewertung möglicher Planungsalternativen in der Einsatzplanberechnung werden die Kosten zur Ausführung eines Einsatzplanes herangezogen. Diese werden als Summe der operativen Zeit der Fahrzeuge für Fahrt und Lastwechsel berechnet. Der Indikator ist sensitiv, auch gegenüber kleinen Effekten und eignet sich insbesondere für die Bewertung von Testinstanzen. Er ist allerdings nicht ausreichend, um Aussagen über den Nutzen von Transfers für ein dynamisches Gesamtsystem zu treffen. Um stochastische Effekte wie Konflikte zwischen den Fahrzeugen oder das Auftreten neuer Transportaufträge und ihren Einfluss auf die Ausführbarkeit bzw. Vorteilhaftigkeit geplanter Transfers berücksichtigen zu können, wird außerdem die Fahrzeugauslastung bewertet.

Den erwarteten Synergieeffekten stehen bedingt durch Umwege zur Anfahrt der Transferpunkte, zusätzliche Lastwechsel und die Notwendigkeit der Pufferung am Transferpunkt negative Effekte (bspw. der Liefer-/Durchlaufzeit) gegenüber. Bei der Einschätzung des Nutzens des vorgeschlagenen Konzepts von Ladungsträgertransfers muss daher zwischen einer Erhöhung der Lieferzeit sowie einer Gefährdung der termintreuen Abarbeitung von Transportaufträgen und einer insgesamt effizienteren Abarbeitung der Transportaufträge abgewogen werden.

Methodisch erfolgt die Evaluierung des Konzepts und der angewendeten Algorithmen zunächst an generierten, zufälligen Testinstanzen. Diese repräsentieren eine konkrete und in sich geschlossene, statische Planungssituation, in der eine Flotte von Fahrzeugen Transportaufträge ausführen muss. Testinstanzen erlauben es in kurzer Zeit eine

Vielzahl möglicher Szenarien mit unterschiedlicher Charakteristik zu untersuchen. Darauf aufbauend können die Algorithmen und Systemcharakteristiken gewählt werden, für die eine weiterführende Untersuchung anhand einer praxisnäheren, dynamischen Materialflusssimulation als sinnvoll erachtet wird.

Für jede Testinstanz sowie Simulation wird eine Lösung, also ein Einsatzplan, mit und ohne Transfers erzeugt und die Systemleistung bewertet.

4 GENERIERUNG VON LÖSUNGEN (EINSATZPLÄNEN)

Zur Generierung von Einsatzplänen werden die in 3.2 eingeführten Verfahren herangezogen und auf Tauglichkeit analysiert. Für das exakte und das metaheuristische Verfahren konnte auf Vorarbeiten verwandter Anwendungsgebiete zurückgegriffen und auf den Anwendungsfall FTS adaptiert werden. Bei der Erweiterung der Heuristik PFSD zur Berücksichtigung von Transfers (PFSD-T) handelt es sich um einen neuartigen Ansatz.

4.1 EXAKTE LÖSUNGSVERFAHREN – PDP-T UND SOLVER

Das exakte Lösungsverfahren beruht auf einem mathematischen Modell, dem *Pickup and Delivery Model with Transfers* (siehe [12]). Das Modell wurde auf den vorliegenden Einsatzfall von FTS adaptiert (u. a. zeitliche Terminierung der Berechnung) und erlaubt so die Untersuchung von Testinstanzen, wobei die Lösungsgenerierung mittels Standardsolver Einsatzpläne sowohl mit als auch ohne Transfers (Solver und Solver-T) zulässt (vergl. [20]). Das Verfahren erlaubt prinzipbedingt die Berechnung optimaler Lösungen.

4.2 APPROXIMATIVES LÖSUNGSVERFAHREN MITTELS METAHEURISTIK – ALNS-T

Als Metaheuristik wird das Verfahren ALNS-T angewendet. Diese Heuristik ist für die Lösung von Tourenplanungsproblemen etabliert und wurde bereits im Kontext der Berechnung von Tourenplänen mit Transfers erforscht (siehe [16]). Für den vorliegenden Anwendungsfall FTS erfolgte eine Adaption mit Fokus auf der Konfiguration geringer Berechnungszeiten.

Bei der ALNS handelt es sich um ein Nachbarschaftssuchverfahren in Kombination mit einem *Simulated Annealing* – der Ansatz wird in Pseudocode 1 beschrieben. Es sieht vor, ausgehend einer bereits existierenden Lösung, in jeder Iteration Transportaufträge zu entfernen und erneut einzufügen. Für das Entfernen und Einfügen werden verschiedene Kriterien, wie bspw. die Wartezeit bis zur ersten Aufnahme herangezogen. Die Gewichtung der verschiedenen Kriterien wird während der Lösungsberechnung anhand ihrer Wirksamkeit zur Identifikation neuer und guter Lö-

sungen angepasst. Wird ein Transfer als vorteilhaft bewertet, soll also berücksichtigt werden, wird ein Transportauftrag anhand eines auszuwählenden Transferpunktes in zwei Teiltransporte geteilt und in den Einsatzplan eingefügt. Die Heuristik akzeptiert für die Iterationsschritte auch schlechtere Lösungen im Vergleich zur aktuell besten Lösung und diversifiziert so den Suchprozess.

Pseudocode 1 ALNS-T

```

1: function ALNS-T(initial solution  $s$ )
2:    $s_{best} = s$ 
3:   while  $time - limit$  not met do
4:      $s' = s$ 
5:     select amount of transport jobs to remove  $q$ 
6:     remove  $q$  transport jobs from  $s'$ 
7:     determine if transfers should be considered
8:     insert removed transport jobs into  $s'$ 
9:     if  $evaluation(s') < evaluation(s_{best})$  then
10:       $s_{best} = s'$ 
11:     if  $accept(s', s) == true$  then
12:        $s = s'$ 
13:   return  $s_{best}$ 

```

Die hier herangezogene, adaptierte Variante der ALNS-T wird in [21] beschrieben. Eine Untersuchung des Einflusses einer Parallelisierung mit bis zu 120 parallelen CPU-Kernen zur Berechnung wird in [22] diskutiert.

4.3 APPROXIMATIVES LÖSUNGSVERFAHREN MITTELS HEURISTIK – PFSD-T

Bei der Heuristik PFSD-T handelt es sich um eine Erweiterung eines Standardansatzes zur Einsatzplanung von FTS. Sie basiert auf der *Pickup First – Shortest Distance*-Strategie. Hier wird die Aufnahme von Ladungsträgern bevorzugt, solange Kapazität auf einem Fahrzeug verfügbar ist. Mit der Regel erfolgt die initiale Zuordnung von Transportaufträgen zu den Fahrzeugen. Auf der Route zu den Lastwechselstationen zur Ausführung der Transportaufgaben passieren die Fahrzeuge Transferstationen, an denen jeweils geprüft wird, ob ein Ladungsträger hinterlassen und sinnvoll einem anderen Fahrzeug zugeordnet werden sollte – der Ansatz wird in Pseudocode 2 skizziert.

Pseudocode 2 PFSD-T

```

1: function TRANSFER PROCEDURE( initial solution  $s$ , vehicles
    $K$ , vehicle at transfer location  $kt$ , accept threshold  $thres$  )
2:    $TL$ : transport loads on  $kt$ 
3:    $c_{best} = cost(s)$ 
4:    $s' = s$ 
5:   for  $tl \in TL$  do
6:     for  $k \in K$  do
7:       if  $k \neq kt$  then
8:         remove  $tl$  from  $s'$ 
9:         insert  $tl$  in  $s'$  for transport by vehicle  $k$ 
10:        if  $cost(s') < (c_{best} - thres)$  then
11:           $c_{best} = cost(s')$ 
12:           $s = s'$ 
13:          brake
14:        else
15:           $s' = s$ 
16:   return  $s$ 

```

Es handelt sich hierbei um eine vergleichsweise einfache Berechnungsvorschrift, die dafür im Vergleich zu Metaheuristiken nur einen begrenzten Planungshorizont erlaubt. Es werden nur die Transportaufträge auf dem Fahrzeug am Transferpunkt und für den Transfer nur Fahrzeuge mit freier Kapazität berücksichtigt. Daraus resultiert der Vorteil, dass Steuerungsentscheidungen mit begrenztem Berechnungsaufwand generiert und so möglicherweise auch größere Fahrzeugflotten gesteuert werden können.

4.4 DISKUSSION DER ÜBERTRAGBARKEIT AUF FTS

Das exakte Lösungsverfahren ermöglicht es, optimale Lösungen für eine Einsatzplanungsaufgabe zu berechnen – absehbar, aber nur für kleine Probleminstanzen. Mit heuristischen Verfahren wird die Generierung, „guter“ (aber mögl. semioptimaler) Lösungen erwartet, jedoch mit dem Vorteil, auch größere Systeme heranziehen zu können. Sie eignen sich bei eingeschränkten Ressourcen (z. B. Berechnungszeit).

Bei heuristischen Verfahren besteht außerdem das Risiko, potenziell nutzenstiftende Transfers systematisch auszuschließen. Mit beiden heuristischen Verfahren wird ein Transportauftrag unter Berücksichtigung eines Transferpunktes in zwei Teilaufträge geteilt und den Fahrzeugen zugeordnet. Reicht der (bewusst eingeschränkte) Planungshorizont dagegen nicht aus, Quelle und Senke zu erfassen, werden mit den heuristischen Verfahren möglicherweise sinnvolle Transfers nicht erkannt.

Die Lösungsverfahren sind für unterschiedliche Problemgrößen gedacht. Mit dem metaheuristischen Verfahren müssen bspw. zahlreiche Iterationen zur Verbesserung durchgeführt werden. Damit ist, ähnlich zu exakten Verfahren, die Problemgröße limitiert. Hinsichtlich der erzielbaren Lösungsgüte, ist für das Verfahren PFSD-T aufgrund des begrenzten Planungshorizontes im Vergleich zu einer Metaheuristik oder einem exakten Lösungsverfahren von schlechteren Ergebnissen auszugehen. Aufgrund seiner hohen Verbreitung im Zusammenhang der Steuerung von FTS (vergl. [23]–[25]) soll es dennoch analysiert werden.

In Konsequenz müssen die Ergebnisse zum Nutzen von Transfers und dem Einfluss der Charakteristik der Transportaufgabe immer mit Blick auf das eingesetzte Lösungsverfahren interpretiert werden.

5 ANALYSE

Im Folgenden werden die in Abschnitt 4 vorgestellten Lösungsverfahren vor dem Hintergrund der Anwendung in der Intralogistik angewendet und anhand von Testinstanzen sowie einer Materialflusssimulation analysiert. Schwerpunkte bilden die Einschätzung zur Eignung einer

Echtzeitplanung sowie die Güte der generierten Einsatzpläne. Die Materialflusssimulation dient dazu, die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf ein dynamisches System zu prüfen, welches stochastischen Einflüssen unterliegt (z. B. Aufkommen neuer Transportaufträge).

5.1 TESTINSTANZEN

Es werden Testinstanzen eingesetzt, um die Lösungsverfahren zu charakterisieren und den Einfluss wesentlicher Systemmerkmale auf die Effekte von Transfers zu untersuchen. Eine Testinstanz repräsentiert ein Szenario mit einer Flotte von Fahrzeugen, die mehrere Transportaufgaben erfüllen muss. Testinstanzen werden auf generische Weise erzeugt, um die Auswirkungen im Allgemeinen und nicht spezifisch für ein bestimmtes Szenario zu untersuchen. Dennoch werden typische Systemmerkmale von FTS berücksichtigt, um die Vorteile im Bereich der Intralogistik zu ermitteln.

Um eine Testinstanz zu erstellen, werden Transportaufträge, Fahrzeuge und Übergabeorte definiert. Die Koordinaten der Orte werden zufällig festgelegt.

Abbildung 1 zeigt das Ergebnis einer Einsatzplanung unter Berücksichtigung eines Transfers. Der Einsatzplan wurde sowohl mit dem Lösungsverfahren Solver-T als auch ALNS-T erzeugt. Er berücksichtigt einen Austausch zweier Ladungsträger am Transferpunkt (Punkt 7 – der Plan ist detailliert im Anhang beschrieben; vergl. Abbildung 4 und Abbildung 5), wodurch die Kosten zur Ausführung um 18 % im Vergleich zur Lösung ohne Transfer reduziert werden. Die Lieferzeit erhöht sich um 11 %.

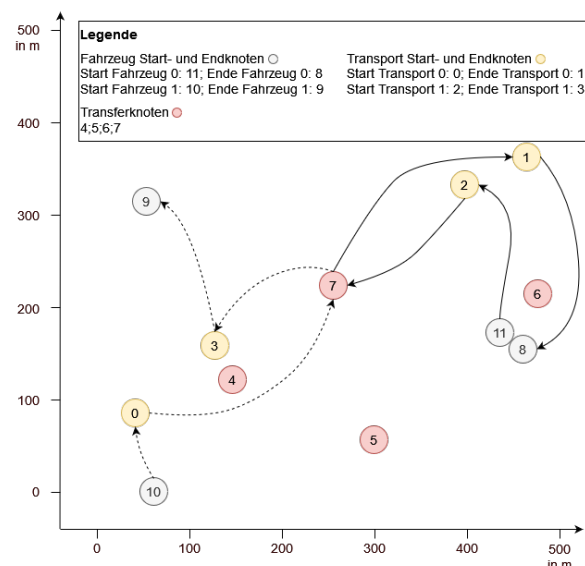


Abbildung 1: Unter Berücksichtigung eines Transfers erzeugter Einsatzplan (vergl. Anhang, Abbildung 4).

Das Ergebnis wurde durch das exakte Lösungsverfahren als optimal klassifiziert, womit umgekehrt kein besserer

Einsatzplan ohne Transfers existiert. Um von den positiven Effekten zu profitieren, müssen die Lösungsverfahren in der Anwendung Einsatzpläne mit Transfers in hoher Lösungsgüte hinreichend schnell berechnen können.

Zur Bewertung der Lösungsverfahren wurden 100 Testinstanzen erzeugt und Einsatzpläne mittels der vorgestellten Lösungsverfahren generiert – jeweils unter Berücksichtigung und unter Vernachlässigung von Transfers. Die Testinstanzen berücksichtigen jeweils 2 Fahrzeuge, 4 Transportaufträge und 4 Transferpunkte.

Zunächst wurde versucht, für die Testinstanzen Einsatzpläne mit einem Standardsolver (CPLEX, Solver-T) zu berechnen. Mit einem Zeitlimit von 30 s konnte keine der Instanzen gelöst werden. Der Ansatz eignet sich damit nicht zur Echtzeitplanung in FTS. Eine Erweiterung des Zeitlimits auf 3000 s (50 min) ermöglichte es, für 48 % der Testinstanzen eine optimale Lösung zu berechnen. Dabei wurden 6 (entspricht 12,5 %) der Testinstanzen unter Berücksichtigung von Ladungsträgertransfers gelöst. Die Verbesserung betrug im Durchschnitt 3,3 % und im Maximum 4,6 %.

Mit der Heuristik ALNS-T und einem Berechnungszeitlimit von 30 s konnten 11 Testinstanzen identifiziert werden, deren Einsatzpläne Transfers berücksichtigen. Eine Verkürzung des Berechnungszeitlimits auf 3 s und eine Verlängerung auf 300 s führte zu vergleichbarem Ergebnis. Die berechneten Einsatzpläne mit Transfers verringerten die Kosten im Mittel um 2,6 % und im Maximum um 7,3 %.

Im Vergleich zu den Ergebnissen von Solver-T war die Lösungsqualität der ALNS-T Heuristik im Mittel 0,9 % schlechter. Insgesamt wurden 4 der 6 durch den Solver ermittelten Lösungen mit Transfers auch mit der ALNS-T Metaheuristik erzielt. Es können also nicht alle vorteilhaften Transfers bzw. zugehörige Einsatzpläne identifiziert werden.

Mit dem heuristischen Ansatz PFSD-T wurden für 7 Testinstanzen Einsatzpläne mit Transfers berechnet. Im Mittel wurde der Zielfunktionswert um 7 % und im Maximum um 13,4 % verbessert. Das Verfahren terminiert, wenn alle notwendigen Einsatzplankombinationen evaluiert wurden. Für alle Instanzen war das jeweils in <1 s der Fall. Im Vergleich zum Verfahren Solver-T ist die Lösungsgüte ca. 33 % schlechter.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die heuristischen Verfahren unter Berücksichtigung von Transfers ähnlich wie der Solver zu besseren Ergebnissen gelangen (vergl. Abbildung 2). Mit ihnen ist eine Echtzeitplanung von Einsatzplänen und damit die Steuerung von FTS möglich. Mit Blick auf die lösbare Problemgröße (z. B. Anzahl Fahrzeuge und Anzahl Transportaufträge) kann davon ausgegangen werden, dass die Metaheuristik

ALNS-T für kleine und die Heuristik PFSD-T für größere Systeme angewendet werden können.

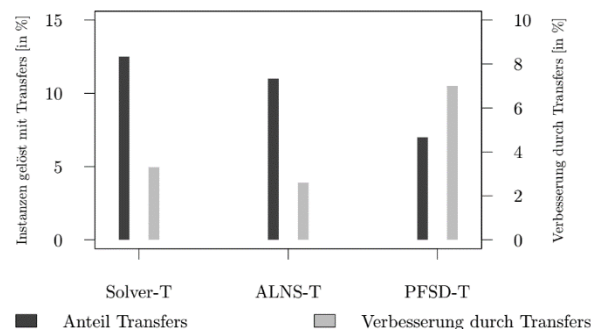


Abbildung 2: Vergleich der Lösungsverfahren nach dem Anteil von Einsatzplänen gelöst unter Berücksichtigung von Transfers und der durchschnittlichen Verbesserung dieser Instanzen.

Die Ergebnisse zeigen, dass Einsatzpläne, die Transfers berücksichtigen, zu einer Verbesserung der Systemleistung beitragen können. Der Anteil an Testinstanzen, die verbessert werden (ca. 10 %) und die Höhe der möglichen Verbesserung (ca. 4 %), legen den Schluss nahe, dass Transfers das Potenzial bieten, einzelne Szenarien bzw. Systemkonfigurationen wesentlich zu verbessern. Im Mittel ist ihr Nutzen allerdings gering. Es gilt daher zu untersuchen, für welche Systeme das Konzept dynamischer Transfers vorrangig geeignet ist.

Hierzu wurden die Ergebnisse aus etwa 60 000 weiteren Testinstanzen ausgewertet. Für ihre Erzeugung wurden verschiedene Charakteristika, in Anlehnung an FTS in der Intralogistik, variiert (vergl. Tabelle 1). Mit der Metaheuristik ALNS-T wurden im Mittel für 8 % der Testinstanzen vorteilhafte Lösungen mit Transfers identifiziert. Die durchschnittliche Verbesserung durch Transfers betrug 2,2 % und im Maximum 26,4 %. Mit der Heuristik PFSD-T werden für 20,2 % der Testinstanzen Einsatzpläne mit Transfers erzeugt. Hier lag die mittlere Verbesserung bei 2,9 % und das Maximum bei 32,7 %.

Die Heuristiken reagieren unterschiedlich auf eine wachsende Anzahl von Transportaufträgen. Zunächst ist davon auszugehen, dass bei einer steigenden Anzahl von Transporten mehr Optionen existieren, in denen von Transfers profitiert werden kann. Beim Einsatz der PFSD-T-Methode zur Berechnung, verdoppelt sich ca. der Anteil von Einsatzplänen, in denen Transfers vollzogen werden. Beim Heranziehen der Metaheuristik ALNS-T ist ein gegenläufiger Effekt zu beobachten: der Anteil sinkt von 15,9 % auf 1,9 %. Hier reicht mutmaßlich die zur Verfügung stehende Zeit (30 s) nicht aus, um ausreichend viele Iterationen durchzuführen und nutzenstiftende Transfers zu identifizieren. Damit eignet sich die hier angewendete Konfiguration der ALNS-T Heuristik allenfalls zur Steuerung kleiner Fahrzeugsysteme.

Mit steigender Anzahl von Transferpunkten kann für beide Lösungsverfahren beobachtet werden, dass für eine größere Anzahl von Testinstanzen vorteilhafte Transferoperationen gefunden werden: Bei 2 Transferpunkten weisen 6,6 % bzw. 12,6 % (für ALNS-T und PFSD-T) der Einsatzpläne für die Testinstanzen Transfers auf, bei 4 bzw. 6 Transferpunkten steigt der Wert auf 9,4 % bzw. 26,9 %. Eine Erhöhung der Anzahl führt also dazu, dass mehr Transfers günstig in die Touren integriert werden können. Weiter ist zu vermuten, dass neben der Anzahl auch die geschickte Positionierung der Transferpunkte einen positiven Effekt auf die Systemleistung hat.

Tabelle 1: Einfluss wesentlicher Systemparameter auf die Berechnung von Einsatzplänen mit Transfers bei Anwendung der Heuristiken ALNS-T und PFSD-T.

Parameter Ausprägung		Anteil errechneter Einsatzpläne mit Transfers der Heuristiken [%]	
		ALNS-T	PFSD-T
Anzahl Transportaufträge [#]	4	15,9	12,3
	8	7,8	20,6
	12	1,9	27,5
Anzahl Transferpunkte [#]	2	6,6	12,6
	4	8,6	20,9
	6	9,4	26,9
Kapazität [#]	1	6,3	19,5
	2	8,4	20,0
	3	9,2	21,0
Geschwindigkeit [m/s]	1	10,0	23,9
	2	7,7	19,9
	3	5,5	16,6

Mit Bezug auf die Fahrzeugeigenschaften wurde der Einfluss der Parameter Kapazität und Geschwindigkeit auf die Berechnung von Einsatzplänen mit Transfers untersucht. Grundsätzlich und vor dem Hintergrund des Lösen des zugrundeliegenden Optimierungsproblems muss zunächst festgehalten werden, dass sich mit steigender Kapazität der Lösungsraum möglicher Einsatzpläne vergrößert. Dafür besteht aber eine höhere Wahrscheinlichkeit, Einsatzpläne zu generieren, bei denen ein Ladungsträgeraus-tausch möglich und vorteilhaft ist. Die Experimente bestätigen dies: Der Anteil durch für ALNS-T und PFSD-T errechneter Einsatzpläne mit Transfers steigt von 6,3 % bzw. 19,5 % bei einer Kapazität von einem Ladungsträger auf 9,2 % bzw. 21 % bei 3 Ladungsträgern.

Gleichwohl zeigen die Ergebnisse, dass auch mit einer Ladungsträgerkapazität von eins Vorteile erzielt werden können. Weniger, weil Routen mit ähnlichem Ziel kombiniert, sondern weil Leerfahrten zur Aufnahme eines Ladungsträgers oder auch zu einer Parkposition für (Teil-)Transporte genutzt werden.

Mit höherer Geschwindigkeit der Fahrzeuge wird es unwahrscheinlicher, dass der zusätzliche Aufwand zum Anfahren bzw. zum Lastwechsel am Transferpunkt kompensiert werden kann. Folglich sinkt bei einer Erhöhung der Geschwindigkeit von 1 m/s auf 3 m/s für beide Lösungsverfahren der Anteil an errechneten Einsatzplänen, die durch Transfers gekennzeichnet sind: von 10 % und 23,9 % auf 5,5 % und 16,6 %.

Ausgehend der Untersuchung mittels Testinstanzen können folgende Schlüsse gezogen werden. Ein Teil der Instanzen offenbarte eine höhere Systemleistung, wenn Einsatzpläne mit Transfers angewendet werden. Im Einzelnen betrug die Verbesserung bis zu 20 %. Im Mittel über alle Instanzen beträgt die Verbesserung lediglich 0,2 %, wobei ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Höhe der Verbesserung und einzelnen Systemparametern (siehe Tabelle 1) zu erkennen ist.

Da eine Berechnung von Einsatzplänen in geringer Zeit möglich ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Steuerung kleiner Flotten mittels ALNS-T und PDFS-T auch in Echtzeit möglich ist. Die Fragestellung, ob die prognostizierten positiven Effekte von Transfers auch in dynamischen, durch stochastische Einflüsse geprägte Systeme realisiert werden können, ist Inhalt des nachfolgenden Abschnittes.

5.2 MATERIALFLUSSSIMULATION

Die Materialflusssimulation wird in Anlehnung an Transportsysteme der Intralogistik anhand eines exemplarischen Systems (vergl. Abbildung 3) durchgeführt. Im Ausgangszustand werden 4 Fahrzeuge mit einer Lastwechselzeit von 10 s, einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 0,5 m/s und einer Kapazität von 2 Ladungsträgern berücksichtigt. Zur Ausführung von Transfers stehen zunächst 3 Transferpunkte (t_4, \dots, t_6) mit unbeschränkter Kapazität zur Verfügung. Weitere Transferpunkte werden in einzelnen Experimenten berücksichtigt. Das Layout hat eine Dimension von 50 x 30 m und verfügt über 36 Lastwechselstationen. Die auszuführenden Transportaufträge wurden randomisiert im Vorfeld erzeugt. Für die Metaheuristik ALNS-T wurde ein Berechnungszeitlimit von 3 s konfiguriert.

Bei Anwendung beider Lösungsverfahren konnte festgestellt werden, dass inhaltlich die Ergebnisse der Untersuchungen mittels Testinstanzen (vergl. Abschnitt 5.1) auf dynamische Systeme mit den damit verbundenen stochastischen Einflüssen wie Fahrzeugkonflikten oder das Aufkommen neuer Transportaufträge übertragen werden können.

Für das Lösungsverfahren ALNS-T wurden bei Simulationsszenarien mit mittlerem Durchsatz Verbesserungen der Kosten zur Ausführung der Transportaufträge von im Mittel 1,9 % und im Einzelnen von bis zu 5 % nachgewiesen. Dabei beträgt die mittlere Reduktion der Lieferzeit 0,7 %.

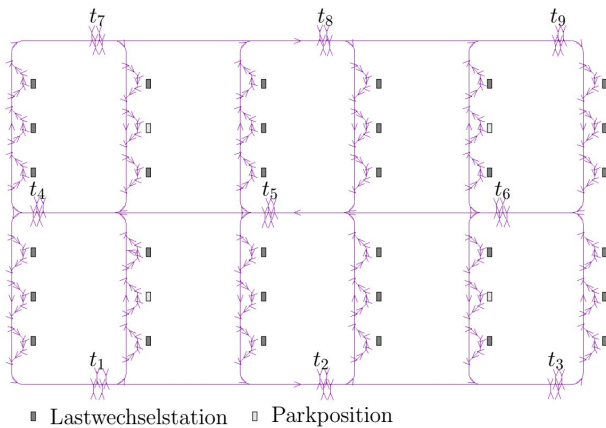


Abbildung 3: Layout des Simulationsmodells mit 9 Transferpunkten ($t_1 \dots t_9$).

Im Mittel über alle Experimente führten die errechneten Einsatzpläne mit Transfers zu einer Kostenverbesserung von 0,9 %. Die Auslastung der Fahrzeuge konnte in vergleichbarem Ausmaß reduziert werden. Im Allgemeinen ist damit ein durchschnittlicher Anstieg der Lieferzeiten um 0,7 % durch das Puffern am bzw. Anfahren des Transferpunktes verbunden.

Da das Lösungsverfahren ALNS-T vollständige Einsatzpläne erzeugt, kann es auch für Offline-Planungsszenarien genutzt werden – bspw. bei wiederkehrenden Transport-szenarien. Für ein exemplarisches Beispiel wurde in diesem Zusammenhang eine Kostenreduktion um 12 % beobachtet.

Auch das Lösungsverfahren PFSD-T war in der Lage, vorteilhafte Einsatzpläne mit Transfers zu generieren. Die Ergebnisse der Materialflusssimulation zeigen für Szenarien mit hoher Mindesttransportdistanz (120 m) eine Reduktion der Kosten für die Ausführung der Transportaufträge um 4,3 % im Mittel und 5,3 % im Maximum. Die mittlere Fahrzeugauslastung reduzierte sich um 3 %. Im Mittel über alle Experimente lag die Reduktion der Kosten bei ca. 1,1 %, bei einer Erhöhung der Lieferzeiten von 3,5 %.

Bei Anwendung beider Lösungsverfahren ist erkennbar, dass der Effekt, der durch die Berücksichtigung von Transfers erzielt werden kann, wesentlich von der Charakteristik der Planungsaufgabe abhängt. So führen bspw. ein Anstieg der Fahrzeuggeschwindigkeit oder der Lastwechselzeit als bestimmende Kosten für die Ausführung von Transferoperationen dazu, dass Einsatzpläne deutlich seltener Transfers aufweisen. Aus der Simulationsstudie wird zudem deutlich, dass auch im Falle einer Ladungskapazität von einem Ladungsträger, Transfers zu Verbesserungen der Systemleistung beitragen. Wie bereits bei der Generierung der Einsatzpläne für die Testinstanzen gezeigt, ist im Planungskontext die Zahl zu berücksichtigender Transportaufträge für die ALNS-T-Heuristik stark begrenzt, weil große Lösungsräume/Kombinatorik eine hinreichend schnelle, praxisgerechte Berechnung verhindern.

Dagegen eignet sich die Heuristik PFSD-T auch für Planungsaufgaben mit einer höheren Zahl an Transportaufträgen.

Zusammenfassend konnte anhand der Materialflusssimulation bestätigt werden, dass unter den getroffenen Annahmen und eingesetzten Heuristiken eine Einsatzplanung für FTS mit der Möglichkeit von Ladungsträgertransfers in Echtzeit möglich ist. Außerdem können die zuvor prognostizierten, positiven Effekte durch Transfers, auch unter Berücksichtigung stochastischer Einflüsse realisiert werden. Dies betrifft die Fahrzeugauslastung und damit den erzielbaren Durchsatz bzw. die Anzahl notwendiger Fahrzeuge. Wie auch bei der Untersuchung mit Testinstanzen sind diese Effekte abhängig von der Charakteristik des Systems.

5.3 POTENZIALE UND GRENZEN

Motivation der hier diskutierten Möglichkeit, im Rahmen der Steuerung von FTS auf Transfers zurückzugreifen und dafür entsprechende Einsatzpläne zu berechnen war, die Effizienz zur Abarbeitung von Transportaufgaben zu erhöhen. Konkret bestand das Ziel in der Reduzierung der Summe der Kosten für Fahrt und Lastwechsel, welche die operative Einsatzzeit der Fahrzeuge repräsentieren. Es konnte gezeigt werden, dass Transfers dies ermöglichen.

Diese Effizienzsteigerung kann dazu beitragen, die Zahl notwendiger Fahrzeuge zu reduzieren bzw. den Durchsatz zu erhöhen.

In der Regel wird die Durchführung von Transfers durch eine Erhöhung der Lieferzeiten begleitet. Dies ist im Wesentlichen ein Resultat der zusätzlichen Transportzeit in Folge des Anfahrens der Transferpunkte, der zusätzlichen Lastwechsel und der Zeit zur Pufferung. Die Wartezeit bis zur ersten Aufnahme von Ladungsträgern kann hingegen verkürzt werden. In einzelnen Fällen, bspw. in Szenarien mit hoher Auslastung, konnte auch eine Reduzierung der Lieferzeiten nachgewiesen werden.

Hinsichtlich der Gesamtausführungszeit eines Einsatzplanes (Makespan) konnte ebenfalls beobachtet werden, dass eine Reduzierung durch die Berücksichtigung von Transfers möglich ist. Im Rahmen dieses Beitrages stellten die Kennzahlen Lieferzeit und Gesamtausführungszeit kein definiertes Zielkriterium dar. Daher sind Untersuchungen ausstehend, welche konkreten Effekte von Einsatzplänen mit Transfers ausgehen, wenn eine Optimierung dieser Faktoren forciert wird.

Kostenvorteile durch Transfers resultieren im Wesentlichen daraus, dass die Fahrstrecken der Fahrzeuge durch Synergien/sich überschneidende Routen verkürzt werden. Damit können weitere positive Effekte, wie bspw. eine Reduzierung von Batterieladevorgängen oder des Verkehrsaufkommens im Streckennetz verbunden sein.

Obschon der hier diskutierten Potenziale und Vorteile von Ladungsträgertransfers in FTS, ist in der praktischen Anwendung/Umsetzung mit zusätzlichem Aufwand zu rechnen. So müssen bspw. die technischen Voraussetzungen zur notwendigen Handhabung erfüllt werden. Außerdem besteht die Gefahr, durch Störungen in der Ausführung oder erhöhten Verkehr am Transferpunkt, Mehraufwand zu verursachen. Hier muss kritisch hinterfragt werden, ob die potenziellen Einsparungen diese Risiken aufwiegen.

Darüber hinaus besteht immanent die Möglichkeit, dass ein als effizient beurteilter Transfer aufgrund einer Änderung des Systemzustandes (z. B. neue Aufträge) nicht mehr vorteilhaft ist – Simulationsergebnisse deuten im Einzelfall darauf hin.

Aus Produktionsplanungs- und Steuerungssicht sind Pufferplätze zur Realisierung von Transfers vorzuhalten. Dabei kann es sich sowohl um dedizierte, ausschließlich zur Realisierung von Transfers vorgehaltene Puffer oder „regulär“ vorgehaltene Speicher handeln. Für beide Fälle gilt, dass der maximale Nutzen durch Transfers nur durch ausreichend Kapazitäten erzielt werden kann.

6 FAZIT

Ladungsträgertransfers unter Fahrzeugen eines FTS führen im Modell zu einer Verbesserung des Systemverhaltens, also Intralogistik-relevanter Kennzahlen. Die angewendeten heuristischen Lösungsverfahren zur Berechnung von Einsatzplänen erfüllen die Anforderungen, eine entsprechend angepasste Steuerung für FTS in Echtzeit zu realisieren. Die Höhe des Nutzens von Ladungsträgertransfers wird wesentlich durch die Eigenschaften des Systems bestimmt. Bei der Abwägung des Einsatzes sollte daher vorab eine Systemanalyse anhand der im Beitrag beschriebenen Parameter durchgeführt werden.

Aufbauend auf den hier beschriebenen Ergebnissen sind weitere Forschungsarbeiten geplant. Ziel ist u. a., zu untersuchen, bis zu welcher Systemgröße das Verfahren PDFS-T in Echtzeit zur Steuerung eingesetzt werden kann und zu bewerten, welche Effekte bei größerer Systemdimension bezogen auf die Systemleistung erzielt werden können.

Darüber hinaus und unabhängig der Lösungsverfahren zur Generierung von Einsatzplänen wird ein weiterer Schwerpunkt die Untersuchung der Positionierung von Transferpunkten sein. Vermutet wird, dass eine optimierte Positionierung dazu beitragen kann, die positiven Effekte von Ladungsträgertransfers zu erhöhen.

LITERATUR

- [1] Y. Zhang, B. Atasoy, D. Souravlias, und R. R. Negenborn, „Pickup and Delivery Problem with Transshipment for Inland Waterway Transport“, in *Computational Logistics*, Bd. 12433, E. Lalla-Ruiz, M. Mes, und S. Voß, Hrsg. Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 18–35. doi: 10.1007/978-3-030-59747-4_2.
- [2] R. Masson, F. Lehuédé, und O. Péton, „Simple Temporal Problems in Route Scheduling for the Dial-a-Ride Problem with Transfers“, in *Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems*, Bd. 7298, D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell, M. Naor, O. Nierstrasz, C. Pandu Rangan, B. Steffen, M. Sudan, D. Terzopoulos, D. Tygar, M. Y. Vardi, G. Weikum, N. Beldiceanu, N. Jussien, und É. Pinson, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 275–291. doi: 10.1007/978-3-642-29828-8_18.
- [3] A. Schrecker, *Planung und Steuerung Fahrerloser Transportsysteme*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2000. doi: 10.1007/978-3-663-08855-4.
- [4] M. De Ryck, M. Versteyhe, und F. Debrouwere, „Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques“, *Journal of Manufacturing Systems*, Bd. 54, S. 152–173, 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2019.12.002.
- [5] M. Lehmann, „Einsatzplanung von Fahrerlosen Transportsystemen in Seehafen-Containerterminals“, Dissertation, Technischen Universität Berlin, 2006.
- [6] P. Toth und D. Vigo, *The Vehicle Routing Problem*, 2. [print.]. Philadelphia, Pa.: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- [7] T. Le-Anh, „Intelligent Control of Vehicle-Based Internal Transport Systems“, PhD Thesis, Erasmus University, Rotterdam, 2005.
- [8] P. Boden, H. Hahne, S. Rank, und T. Schmidt, „Dispatching of Multiple Load Automated Guided Vehicles Based on Adaptive Large Neighborhood Search“, in *Operations Research Proceedings 2019*, J. S. Neufeld, U. Buscher, R. Lasch, D. Möst, und J. Schönberger, Hrsg. Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 375–380. doi: 10.1007/978-3-030-48439-2_45.
- [9] P. J. Egbelu und J. M. A. Tanchoco, „Characterization of automatic guided vehicle dispatching rules“, *International Journal of Production Research*, Bd. 22, Nr. 3, S. 359–374, 1984, doi: 10.1080/00207548408942459.
- [10] Y.-C. Ho und S.-H. Chien, „A Simulation Study on the Performance of Task-Determination Rules and Delivery-Dispatching Rules for Multiple-Load AGVs“, *International Journal of Production Research*, Bd. 44, Nr. 20, S. 4193–4222, 2006, doi: 10.1080/00207540500442401.
- [11] C. E. Cortés, M. Matamala, und C. Contardo, „The pickup and delivery problem with transfers: Formulation and a branch-and-cut solution method“, *European Journal of Operational Research*, Bd. 200,

- Nr. 3, S. 711–724, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.ejor.2009.01.022.
- [12] A. Rais, F. Alvelos, und M. S. Carvalho, „New mixed integer-programming model for the pickup-and-delivery problem with transshipment“, *European Journal of Operational Research*, Bd. 235, Nr. 3, S. 530–539, 2014, doi: 10.1016/j.ejor.2013.10.038.
- [13] H. L. Petersen und S. Ropke, „The Pickup and Delivery Problem with Cross-Docking Opportunity“, in *Computational Logistics*, Berlin, Heidelberg, 2011, S. 101–113.
- [14] R. Masson, F. Lehuédé, und O. Péton, „An Adaptive Large Neighborhood Search for the Pickup and Delivery Problem with Transfers“, *Transportation Science*, Bd. 47, Nr. 3, S. 344–355, 2013, doi: 10.1287/trsc.1120.0432.
- [15] B. Coltin, „Multi-agent Pickup and Delivery Planning with Transfers“, PhD Thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 2014.
- [16] A. Sampaio, M. Savelsbergh, L. P. Veelenturf, und T. Van Woensel, „Delivery systems with crowd-sourced drivers: A pickup and delivery problem with transfers“, *Networks*, Bd. 76, Nr. 2, S. 232–255, 2020, doi: 10.1002/net.21963.
- [17] R. Masson, F. Lehuédé, und O. Péton, „The Dial-A-Ride Problem with Transfers“, *Computers & Operations Research*, Bd. 41, S. 12–23, 2014, doi: 10.1016/j.cor.2013.07.020.
- [18] R. T. Takoudjou, J.-C. Deschamps, und R. Dupas, „A Hybrid Multistart Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with and without Transshipment“, in *9th International Conference on Modeling, Optimization & SIMulation*, Bordeaux, France, 2012.
- [19] H. Shiri, M. Rahmani, und M. K. Bafruei, „Examining the impact of transfers in pickup and delivery systems“, *Uncertain Supply Chain Management*, S. 207–224, 2020, doi: 10.5267/j.uscm.2019.7.003.
- [20] P. Boden, S. Rank, und T. Schmidt, „Control of heterogeneous AMHS in semiconductor industry under consideration of dynamic transport carrier transfers“, *22nd IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2021.
- [21] Boden, Patrick, Rank, Sebastian, und Schmidt, Thorsten, „Modified Adaptive Large Neighborhood Search for Scheduling Automated Guided Vehicle fleets considering dynamic transport carrier transfers“, *Logistics Journal : Proceedings*, Bd. 20, S. Issue 12, 2020, doi: 10.2195/LJ_PROCODEN_BODEN_EN_202012_01.
- [22] P. Boden, S. Rank, und T. Schmidt, „Scheduling by High-Performance Computing -An example for AGV considering dynamic transport carrier transfers“, *Ist Virtual European advanced process control and manufacturing (apc|m) Conference*, 2021.
- [23] P. Azimi, H. Haleh, und M. Alidoost, „The Selection of the Best Control Rule for a Multiple-Load AGV System Using Simulation and Fuzzy MADM in a Flexible Manufacturing System“, *Modelling and Simulation in Engineering*, Bd. 2010, Nr. 3, S. 1–11, 2010, doi: 10.1155/2010/821701.
- [24] M. Ozden, „A simulation study of multiple-load-carrying automated guided vehicles in a flexible manufacturing system“, *International Journal of Production Research*, Bd. 26, Nr. 8, S. 1353–1366, 1988, doi: 10.1080/00207548808947950.
- [25] P. Nayyar und S. K. Khator, „Operational control of multi-load vehicles in an automated guided vehicle system“, *Computers & Industrial Engineering*, Bd. 25, Nr. 1–4, S. 503–506, 1993, doi: 10.1016/0360-8352(93)90330-Z.

Patrick Boden, M. Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Technische Logistik, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Technische Universität Dresden. Seine Forschungsinteressen umfassen Steuerungsstrategien für FTS sowie Logistikanwendungen in der Halbleiterindustrie.

Adresse: Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Professur für Technische Logistik, 01062 Dresden, Germany.
Telefon: +49 351 463 33256
Fax: +49 351 463 35499
E-Mail: patrick.boden@tu-dresden.de

Dr.-Ing. Sebastian Rank, ist Postdoktorand an der Professur für Technische Logistik, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Technische Universität Dresden. Seine Forschungsinteressen umfassen die Autokorrelation in logistischen Systemen und die AMHS-Simulation in der Halbleiterproduktion. Er ist Mitglied der ASIM.

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt, ist Leiter der Professur für Technische Logistik, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Technische Universität Dresden. Er ist ordentlicher Professor und leitet den Lehrstuhl seit 2008. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der Gestaltung und Optimierung von Logistik- und Produktionssystemen, wobei er sich auf die beteiligten Maschinen und Komponenten konzentriert. Derzeit arbeitet er an energieeffizienten Regelungsstrategien im Materialfluss, einer schnellen Approximation in frühen Planungsphasen mittels Standard-Entwurfsmodulen, Leichtbaustrukturen in der Fördertechnik und der Spannungsanalyse in Drahtseilen und Zahnriemen.

FÖRDERHINWEIS

Das IGF-Vorhaben 21269 BR (‘iDynaTrans’) der Forschungsvereinigung Intralogistik/ Fördertechnik und Logistiksysteme e. V. (IFL) wird über die AiF im Rahmen

des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



ANHANG

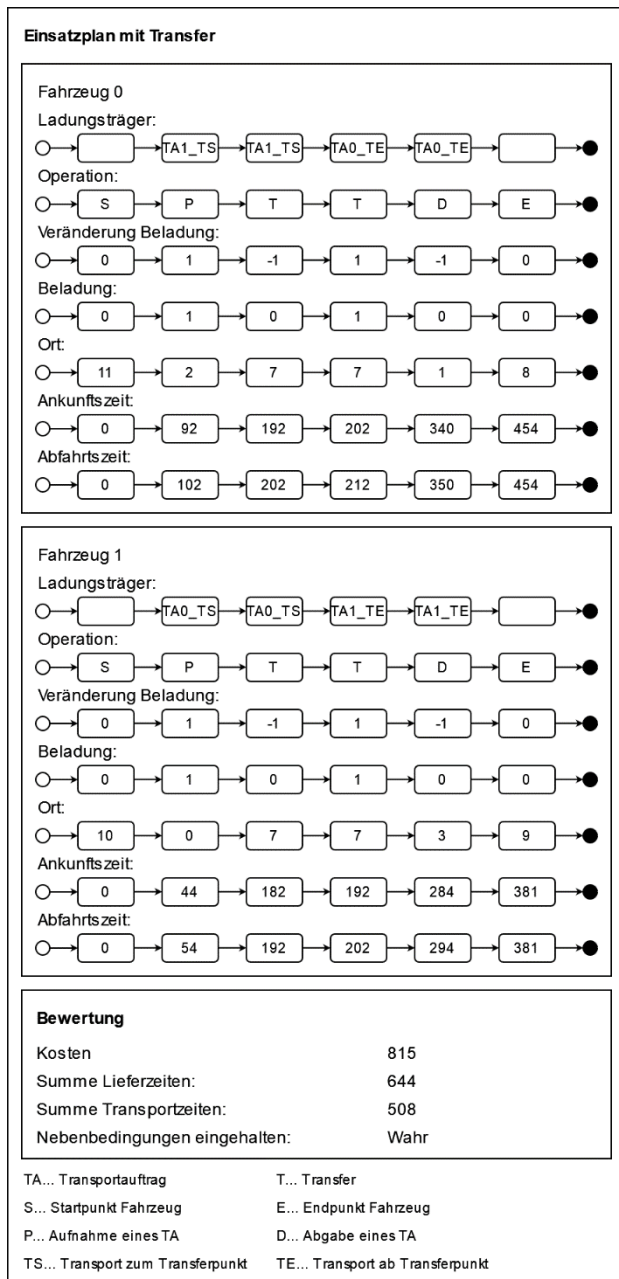


Abbildung 4: Einsatzplan unter Berücksichtigung von Transfers.

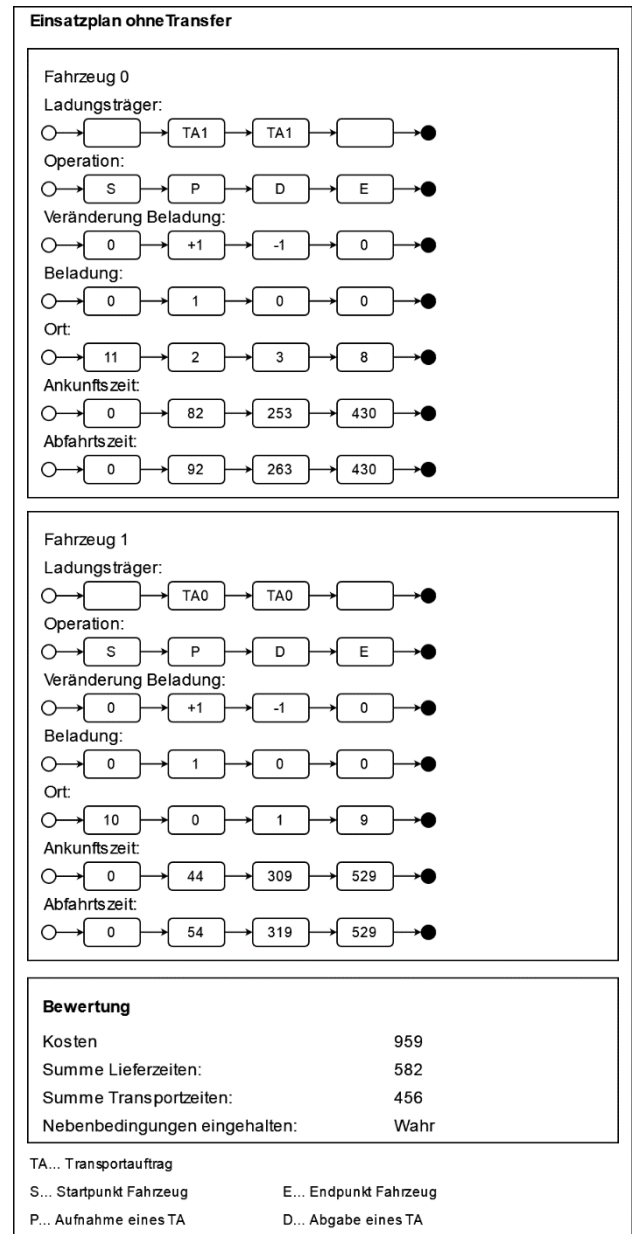


Abbildung 5: Einsatzplan unter Vernachlässigung von Transfers.