

Schlussbericht vom 15.03.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21269 BR

Thema

Realisierung automatisierter fahrzeugbasierter Transportsysteme mit dynamischen Transferpunkten im Bereich der Intralogistik

Berichtszeitraum

01.07.2020 bis 31.12.2022

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Dresden
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Professur für Technische Logistik

Gefördert durch:

1. Kurzfassung des Projektverlaufes und der Ergebnisse

Bei der projektausführenden Forschungseinrichtung kam es zwischenzeitlich zu Verzögerungen bei der Besetzung der zugehörigen Stelle. Eine kostenneutrale Verlängerung des Forschungsvorhabens wurde beantragt und vom Fördermittelgeber stattgegeben. Der neue Bewilligungszeitraum wurde auf den 01.07.2020 bis zum 31.12.2022 festgelegt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens lag in der Entwicklung und Evaluierung eines Steuerungsansatzes, der den dynamischen Austausch von Ladungsträgern zwischen den Fahrzeugen eines Fahrerlosen Transportsystems (FTS) erlaubt. Ein solcher Austausch wird als *Transfer* bezeichnet und wurde in vergleichbaren Anwendungsdomänen wie der Distributionslogistik (vgl. Mitrović-Minić and Laporte, 2006) und dem Personentransport (vgl. Masson et al., 2012) bereits eingehend untersucht. Für die Intralogistik und im speziellen FTS ist hingegen unklar, ob Transfers in der Systemsteuerung berücksichtigt und welche Effekte mit ihnen erzielt werden können.

Zu diesem Zweck wurde im Rahmen des Projektes ein Konzept für die Berücksichtigung dynamischer Transfers in FTS erarbeitet. Es basiert auf Vorarbeiten aus anderen Anwendungsdomänen und adaptiert sie unter Beachtung technischer Anforderungen von FTS. Vereinfachend sieht das Konzept vor, dass Ladungsträger an definierten Transferpunkten hinterlegt werden können (vgl. „TP“ in Abbildung 1). Von dort werden sie anschließend erneut aufgenommen, um den Transport weiterzuführen. Auf diese Weise können Ladungsträger beliebig oft zwischen den Fahrzeugen getauscht werden. Transfers sollen nur dann berücksichtigt werden, wenn mit ihnen ein positiver Effekt auf die Systemleistung prognostiziert wird. Da über ihre Ausführung ad-hoc entschieden wird, werden sie als *dynamisch* bezeichnet. Eine detaillierte Beschreibung des Konzeptes kann Boden et al. (2022a) und Boden et al. (2021a) entnommen werden.

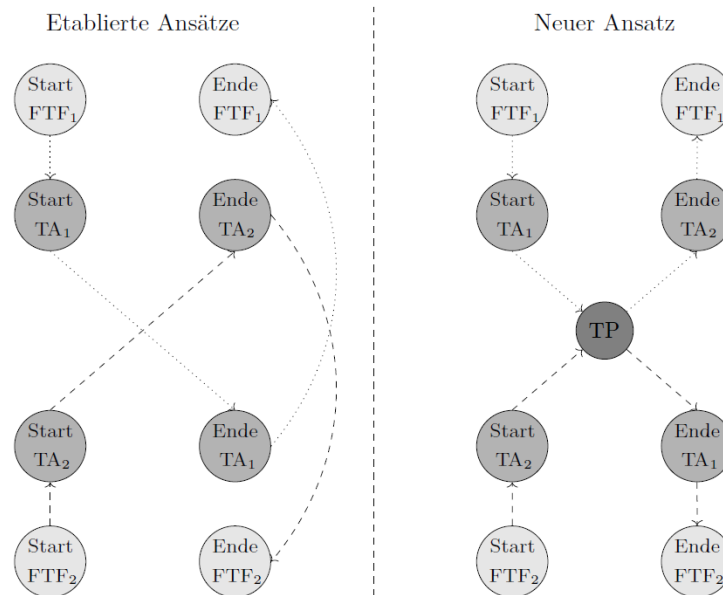


Abbildung 1: Einsatzplanung eines für Fahrzeuge (FTF) eines Fahrerlosen Transportsystems unter Vernachlässigung (links) und Berücksichtigung (rechts) eines Transfers am Transferpunkt (TP) (siehe Boden et al., 2020)

Für die Umsetzung des Konzepts zur Einsatzplanung für FTS wurden mathematische Optimierungsmodelle erstellt und drei relevante Lösungsverfahren adaptiert, sodass dynamische Transfers eingeplant werden können. Untersucht wurden ein exaktes Lösungsverfahren und zwei heuristische Verfahren. Mit dem exakten Verfahren können nachweislich optimale Einsatzpläne berechnet werden. Die heuristischen Verfahren erlauben die Berechnung möglichst guter Lösungen. Die Verfahren sind mit Hinblick auf die lösbare Problemgröße (insb. Anzahl Fahrzeuge und Transportaufträge) für verschiedene Anwendungsszenarien geeignet. Die Evaluierung erfolgte anhand von Testinstanzen und einer Materialflusssimulation. Während Testinstanzen ein in sich geschlossenes Einsatzplanungsszenario abbilden, ermöglicht die Materialflusssimulation stochastische Effekte abzubilden. Hierzu zählen z. B. neu auftretende Transportaufträge. Einsatzpläne werden anhand der Kosten bewertet, die für ihre Ausführung notwendig sind. Diese Kosten repräsentieren die operative Einsatzzeit der Fahrzeuge für Fahrt und Lastwechsel. Werden sie reduziert, sind positive Effekte auf die Auslastung der Fahrzeuge und den erzielbaren Durchsatz zu erwarten.

Dynamische Transfers erhöhen die Flexibilität von Einsatzplänen. Mit ihnen wird es möglich, Synergieeffekte zu nutzen und bspw. Transporte mit ähnlichem Ziel zu kombinieren. Die Experimente zeigen, dass dynamische Transfers zu einer Kostenreduzierung im Vergleich zur Referenzlösung ohne Transfers führen. In Einzelfällen beträgt diese Kostenreduktion bis zu 50 %. Im Allgemeinen liegen die Verbesserungen in einem niedrigeren Bereich (bis zu 10 %). Dabei steht das Verbesserungspotenzial in einem Zusammenhang zur Charakteristik des Systems. Hier hat insbesondere die Lastwechselzeit einen wesentlichen Einfluss darauf, ob der zur Ausführung eines Transfers notwendige Aufwand kompensiert werden kann. Durch umfangreiche Materialflusssimulationen konnte bestätigt werden, dass dynamische Transfers auch in einem durch stochastische Unsicherheiten geprägten System zu positiven Effekten führen können. Die detaillierten Ergebnisse werden in Boden et al. (2020b, 2021a, 2022b, 2022a) beschrieben.

Zusammenfassend wird mit dem Projekt anhand repräsentativer Modelle gezeigt, wie Transfers dynamisch für die Einsatzplanung von FTS berücksichtigt und dass mit ihnen positive Effekte auf die Systemleistung erzielt werden können.

2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum

Um dynamische Ladungsträgertransfers für die Steuerung von FTS berücksichtigen zu können, gilt es (1) Transferpunkte in einem Streckennetz geeignet zu platzieren und (2) Transportaufträge so aufzuteilen und den Fahrzeugen zuzuordnen, dass ein positiver Effekt erzielt wird. In Teilaspekt (2) liegt der FuE-Schwerpunkt dieser Arbeit/des Projekts. Ziel ist es zu zeigen, wie Transfers für die Einsatzplanung berücksichtigt werden können und, dass mit ihnen grundsätzlich positive Effekte erzielbar sind. In einer optimierten Positionierung möglicher Transferpunkte wird das Potenzial gesehen, die Effekte zu verstärken. Dies wird als Sekundärziel verfolgt und untersucht.

Entsprechend des Primärziels des Projektes lauten die Arbeitshypothesen wie folgt:

- *Dynamische Ladungsträgertransfers führen zu Effizienzsteigerungen in fahrerlosen Transportsystemen.*
- *Die Effizienzsteigerung ist abhängig von der Charakteristik des Systems.*

Ausgehend von den Arbeitshypothesen wird ein dreistufiger Lösungsweg verfolgt, auf dessen Basis die im Folgenden beschriebenen Arbeitspakete (AP) strukturiert sind. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag in der Entwicklung einer FTS-Steuerung (also primär der Generierung von Einsatz- bzw. Transportplänen) und ihrer Evaluierung.

Lösungsweg

1. *Adaption und Implementierung eines Modells und Lösungsalgorithmus für das Online-/Echtzeit-Dispatching von FTS unter Berücksichtigung von Ladungsträgertransfers*
2. *Charakterisierung und Klassifizierung von Konzepten für die Ausführung dynamischer Ladungsträgertransfers und Materialflüssen in FTS*
3. *Bewertung des Einflusses dynamischer Ladungsträgertransfers in Abhängigkeit von Einsatzumgebung und Transferkonzept*

AP 1 Identifikation und Systematisierung relevanter Systemparameter

Ziel

Das Ziel dieses Arbeitspaketes besteht darin, Konzepte für dynamische Ladungsträgertransfers in FTS zu entwickeln und darauf aufbauend, Anforderungen an die Planung und Steuerung zu abstrahieren. Weiterhin sollen charakteristische Systemparameter herausgearbeitet werden, um eine Evaluierung des Nutzens spezifisch für FTS zu ermöglichen.

Vorgehen

Konzepte für die Realisierung von Transfers wurden auf Basis einer systematischen Literaturrecherche über deren Anwendung in alternativen Anwendungsdomänen erfasst. Anforderungen eines FTS konnten auf Basis der Recherche von Literatur, der Analyse eines realen Systems und von Workshops mit Experten (vor allem aus dem Projektbegleitenden Ausschuss) herausgearbeitet werden. Anforderungen und Möglichkeiten zur Realisierung dynamischer Transfers wurden in einem neuartigen Konzept zusammengeführt.

Ergebnis

Charakterisierung von FTS

Bei einem FTS handelt es sich um ein innerbetrieblich genutztes Fördersystem mit automatisch gesteuerten Fahrzeugen. Diese operieren in einem definierten Streckennetz, um Stationen bspw. für den Lastwechsel oder das Parken zu erreichen. Um einen automatisierten Lastwechsel auszuführen, sind die Lastwechselstationen und/oder das Fahrzeug mit Handhabungstechnik auszurüsten.

FTS werden in der Regel zentral gesteuert (vgl. De Ryck et al., 2020). Dafür ist charakteristisch, dass aktuelle Informationen über das Gesamtsystem verfügbar sind und jedes Fahrzeug direkt angesteuert werden kann. Steuerungsentscheidungen sind in Echtzeit zu berechnen, wofür lediglich ein kurzes Zeitintervall von wenigen Sekunden zur Verfügung steht.

Im Kontext der Intralogistik sind FTS für ein breites Anwendungsspektrum geeignet. Die Anforderungen an das System sind somit ebenfalls vielfältig, woraus eine Vielzahl unterschiedlicher Systemvarianten resultiert. Abstrahiert, können diese anhand charakteristischer

Systemparameter beschrieben werden. Typische Systemparameter werden in Tabelle 1 beschrieben:

Tabelle 1: Typische Systemdimensionen eines FTS (vgl. Ullrich, 2014)

PARAMETER	AUSPRÄGUNG
ANZAHL FAHRZEUGE	ein bis mehrere hundert
GESCHWINDIGKEIT	typischerweise 1 m/s
FAHRKURLÄNGE	bis zu mehreren Kilometern
ANZAHL ÜBERGABESTATIONEN	unbegrenzt
EINSATZDAUER	sporadisch bis Dauerbetrieb

Konzept

Dynamische Ladungsträgertransfers wurden für FTS bisher nicht untersucht. Im Kern sieht das Konzept vor, dass Ladungsträger zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden können. Zur Ausführung dieses Lastwechsels sind zwei Varianten naheliegend: (1) der Austausch über eine Lastwechselstation und (2) der direkte Austausch zwischen den Fahrzeugen. Während Variante (1) einem herkömmlichen Lastwechsel entspricht, ist Variante (2) mit Hinblick auf die technische Realisierung und die Evaluierung geeigneter Transferoperationen in der Systemsteuerung deutlich anspruchsvoller. Gleichzeitig ist der Nutzen fraglich, da die Fahrzeuge aufeinander abgestimmt und ggf. warten müssen, um einen Austausch durchzuführen. Daher wurde für das Projekt der Austausch über einen Transferpunkt als Vorzugsvariante gewählt. In einer Kombination aus beiden Varianten (1 und 2) werden weiteres Optimierungspotenzial und Fragestellungen für anschließende Forschungsarbeiten gesehen.

Für die Realisierung des Konzeptes sind Lastwechselstationen als Transferpunkte für einen Austausch zu definieren. Im Idealfall sollten sie mehrere Ladungsträger aufnehmen, einen direkten Zugriff auf all ihre Pufferplätze erlauben und von mehreren Fahrzeugen gleichzeitig angefahren werden können. Sind die Fahrzeuge mit aktiver Handhabungstechnik ausgerüstet, könnte ein einfaches Regal (vgl. Abbildung 2) diese Anforderungen erfüllen. Die Transferpunkte sollten so angeordnet werden, dass sie insgesamt mit geringem Umweg erreicht werden können. Konkrete Strategien hierzu werden im Projekt erarbeitet.

Um Transfers durchzuführen, können Transportaufträge beliebig oft unterbrochen und die Ladungsträger zwischen den Fahrzeugen getauscht werden. Übergaben, werden unter Berücksichtigung des aktuellen Systemzustands geplant. Sie sollen nur dann erfolgen, wenn sie mit Blick auf die (Gesamt-)Systemleistung einen Vorteil versprechen.



Abbildung 2: Beispiel einer geeigneten Konfiguration für die Realisierung des Konzeptes mit einem Regal als Transferpunkt (siehe www.fabmatics.com)

Anforderungen an die Steuerung

Die Identifikation geeigneter Transfers ist Teil der Einsatzplanung. Mit der Einsatzplanung wird festgelegt, welches Fahrzeug einen Transportauftrag ausführt. Es ist davon auszugehen, dass mit Berücksichtigung möglicher Transfers die Einsatzplanung und der damit einhergehenden gesteigerten Flexibilität, Steuerungsentscheidungen deutlich erschwert werden – insbesondere unter dem Aspekt der Echtzeitanforderung. Hintergrund ist, dass Transferpunkte das Spektrum möglicher Touren- und Einsatzpläne erhöhen und z. B. deren Verfügbarkeit oder die singuläre Entscheidung zur Aufteilung von Transporten in Teiltransporte als zusätzliche Randbedingungen zu berücksichtigen sind.

AP 2 Abstraktion des Steuerungsansatzes und Modellbildung

Ziel

Das Arbeitspaket zielt darauf ab, ein mathematisches Modell zur Definition der Einsatzplanungsaufgabe von FTS unter Berücksichtigung dynamischer Transfers zu erarbeiten.

Vorgehen

Analyse der in der Literatur beschriebenen mathematischen Modelle zur Berücksichtigung von Transfers in Tourenplanungsproblemen aus anderen Anwendungsdomänen. Adaption eines Modells auf den Einsatzfall FTS.

Ergebnis

Grundsätzlich kann die Einsatzplanung von FTS als Tourenplanungsproblem aufgefasst werden. Dabei ist bspw. die Abstraktion als Pickup and Delivery Problem (PDP) geeignet. Hier werden Transportaufträge als Quelle-Senke-Beziehung modelliert, was den Transporten mit FTS prinzipiell entspricht.

Die in AP1 herausgearbeiteten, für die Einsatzplanung relevanten Merkmale von FTS wurden mit jenen für die Berücksichtigung von Transfers zusammengeführt. Einen Überblick der Parameter des abzubildenden Tourenplanungsproblem kann Abbildung 3 entnommen werden.

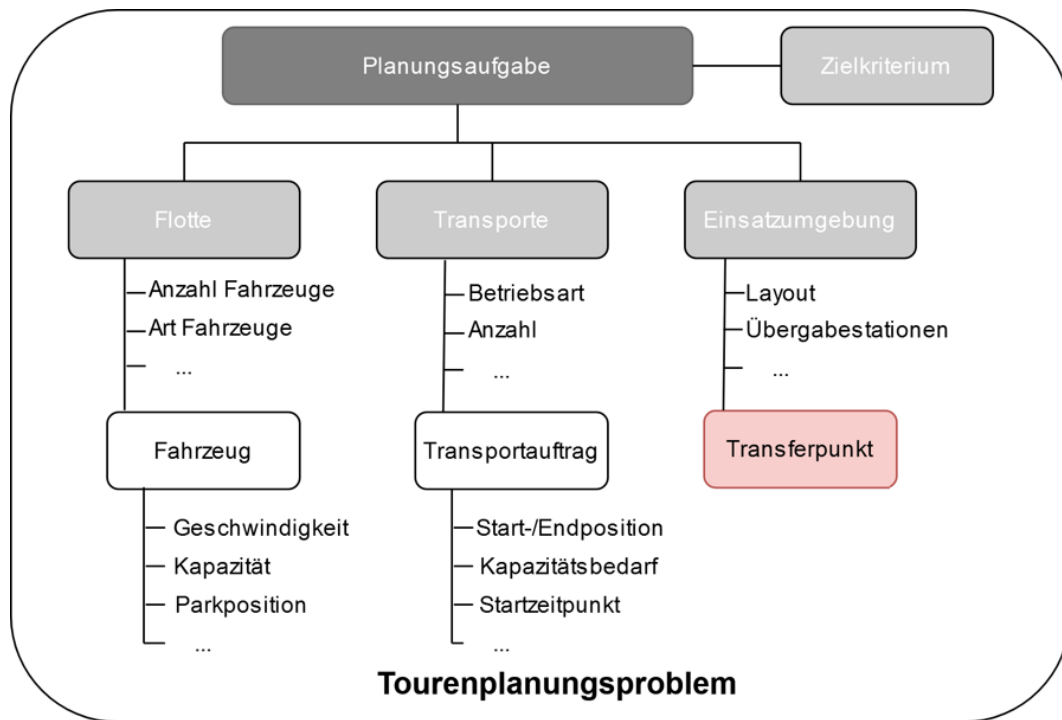


Abbildung 3: Auszug zu relevanten Parametern des mit einer Einsatzplanung zu lösenden (Touren-)Planungsproblems (siehe Boden et al., 2022c)

Auf Basis der Arbeit von Rais et al. (2014) wurde ein mathematisches Modell auf den Einsatzfall FTS adaptiert. Es kann Boden et al. (2021a) entnommen werden. Das Modell erlaubt den Austausch von Ladungsträgern an statischen, a priori festgelegten Transferpunkten. Mit der Zielfunktion werden möglichst geringe „Kosten“ (benötigte Zeit für Fahrt und Lastwechsel) für die Ausführung von Transportaufgaben angestrebt. Werden Verbesserungen erzielt, sind positive Effekte auf die Fahrzeugauslastung und den erzielbaren Durchsatz des Systems zu erwarten.

AP 3 Identifikation und Bewertung heuristischer Lösungsverfahren

Ziel

Ziel des Arbeitspaketes ist es, auf der Grundlage der Erkenntnisse aus AP1 und AP2 geeignete Berechnungsverfahren zur Generierung von Einsatzplänen zu identifizieren.

Vorgehen

Analyse und Bewertung der in der Literatur beschriebenen Lösungsverfahren zur Generierung von Einsatzplänen unter Berücksichtigung von Transfers und den speziellen Anforderungen an die Steuerung von FTS.

Ergebnis

Die Steuerung von FTS erfordert eine schnelle Lösungsfindung, mit der in einem kurzen Zeitraum eine möglichst hohe Lösungsqualität erzielt werden kann, auch, wenn größere Systeme mit zahlreichen Fahrzeugen und Transportaufträgen zu handhaben sind.

In der wissenschaftlichen Literatur werden vor allem exakte Lösungsverfahren (vgl. Cortés et al., 2010; Rais et al., 2014) und Metaheuristiken (vgl. Danloup et al., 2018; Sampaio et al., 2020) für die Generierung von Einsatzplänen unter Berücksichtigung von Transfers untersucht. Vergleichsweise einfache regelbasierte, bereits etablierte Heuristiken zur Steuerung von FTS waren bisher nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Eine exakte Lösung der Einsatzplanung zugrunde liegender mathematischer Problemformulierungen ist auf kleine Systeme mit wenigen Fahrzeugen und Transportaufträgen (z. B. bis zu 6 Aufträge, in Cortés et al., 2010) beschränkt. Die Verfahren beruhen im Wesentlichen auf Branch and Bound Ansätzen und der Anwendung von Standardsolvern (z. B. CPLEX). Im Allgemeinen ist die Dauer zur Lösungsgenerierung hoch und ungewiss, überhaupt eine (gültige) Lösung zu finden (siehe Qu and Bard, 2012). Eine Anwendung von Standardsolvern im Rahmen einer Echtzeitsteuerung von FTS ist damit nicht möglich.

Als Metaheuristik wurde in den ausgewerteten Arbeiten vorwiegend das Verfahren Adaptive Large Neighborhood Search eingesetzt (siehe Sampaio et al., 2020). So kann auch für größere Fahrzeugsysteme eine hohe Lösungsqualität erreicht werden. In Benchmarks zur Einsatzplanung ohne Transfers (vgl. Li & Lim Benchmark¹) und im Vergleich zu alternativen Lösungsverfahren für die Einsatzplanung mit Transfers (vgl. Hincapie-Potes and Lesmes-Ramirez, 2018) werden gute Ergebnisse erzielt. In den bisher durchgeführten Studien wurde das Verfahren mit einer Konfiguration für offline Planungsprobleme ohne explizite Echtzeitanforderung getestet – teils wurden mehrere Stunden für die Generierung von Einsatzplänen gebilligt. Die Ergebnisse legen nahe, dass für kleine Fahrzeugsysteme auch eine Echtzeitplanung möglich sein kann.

Abbildung 4 zeigt eine Übersicht zu den im weiteren Verlauf des Projektes evaluierten Lösungsverfahren. Ausgehend von einer Beschreibung der Planungsaufgabe als mathematisches Modell, wurden Einsatzpläne mit einem exakten und zwei heuristischen Verfahren generiert. Die exakte Lösung mittels Standardsolver dient der Einschätzung der Lösungsgüte der heuristischen Verfahren. Als Metaheuristik wurde das Verfahren Adaptive Large Neighborhood Search in einer Konfiguration getestet, welche eine Echtzeitplanung für FTS erlaubt. Ergänzend dazu wurde eine Heuristik zur Steuerung von FTS so adaptiert, dass mit Ihr Transfers berücksichtigt werden können.

¹ <http://www.sintef.no/pdptw>

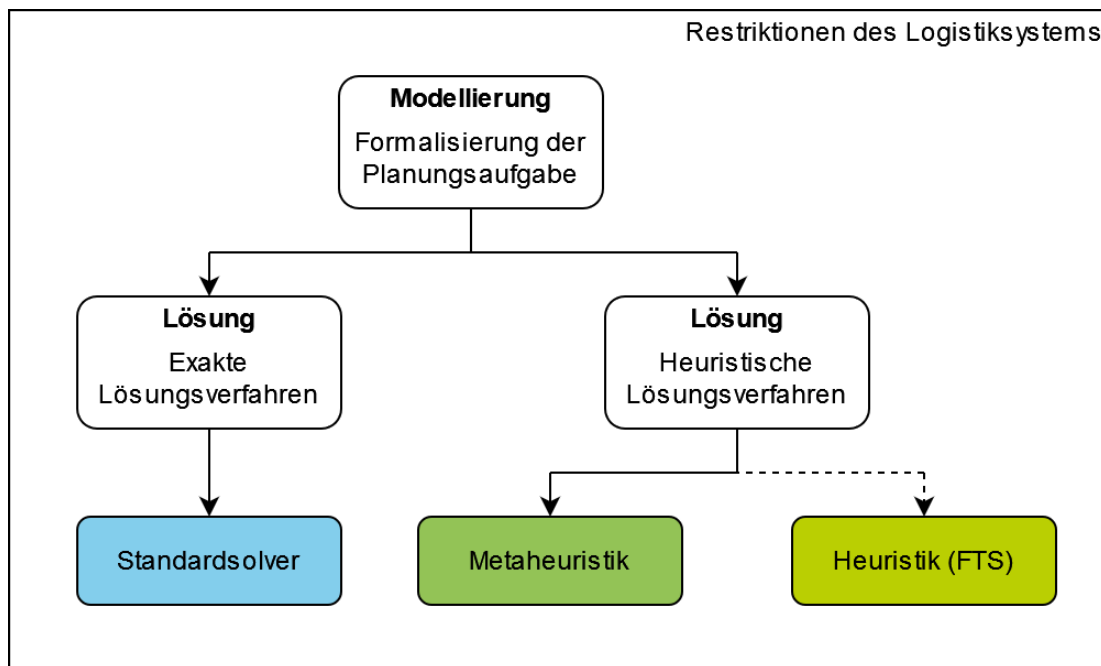


Abbildung 4: Übersicht der für die Untersuchung des Konzeptes ausgewählten Lösungsverfahren (siehe Boden et al., 2022c)

AP 4 Implementierung Lösungsverfahren und Aufbau

Testumgebung

Ziel

Ziele des Arbeitspaketes sind die Implementierung der ausgewählten Lösungsverfahren und der Aufbau einer Testumgebung.

Vorgehen

Die ausgewählten Lösungsverfahren wurden auf den Anwendungsfall FTS adaptiert und implementiert. Darüber hinaus wurde eine Testumgebung entwickelt, welche die Durchführung von Experimenten mit Testinstanzen und einer Materialflusssimulation automatisiert erlaubt.

Ergebnis

Im Folgenden werden die Implementierung der ausgewählten Lösungsverfahren und der Elemente der Testumgebung beschrieben.

Lösungsverfahren

Das exakte Lösungsverfahren basiert auf einem mathematischen Modell, das mit dem Python Paket PYOMO² implementiert wurde. Dies erlaubt die Anbindung verschiedener Standardsolver. Als Ergebnis aus Leistungstests wurde CPLEX für die Durchführung der Experimente ausgewählt – Einzelheiten hierzu werden in Boden et al. (2019, 2021a) beschrieben.

Pseudocode 1 beschreibt den Ablauf der Adaptive Large Neighborhood Search für die Berücksichtigung von Transfers (ALNS-T). Das Verfahren zielt darauf ab, eine Ausgangslösung

² <http://www.pyomo.org/>

iterativ zu verbessern. Zu diesem Zweck werden in jeder Iteration Transportaufträge aus dem zu untersuchenden Einsatzplan entfernt und erneut eingefügt. Für das Einfügen kann ein Transportauftrag in zwei Teiltransporte geteilt werden, um einen Transfer abzubilden. Die Suche wird durch einen Simulated Annealing Ansatz gesteuert, der es erlaubt, schlechtere als die bisher beste bekannte Lösung zur weiteren Untersuchung auszuwählen. Auf diese Weise werden verbesserte Lösungen ermöglicht, weil die Vielfalt der Suche erhöht bzw. das Risiko des Findens lediglich lokaler zugunsten globaler Optima im Lösungsraum reduziert werden.

Das Verfahren wurde so implementiert, dass es für die parallele Berechnung auf Mehrkernprozessoren geeignet ist. Es wurde die Programmiersprache C++ genutzt, um eine schnelle Ausführung des Programms zu unterstützen. Das Verfahren und seine Implementierung werden in Boden et al. (2020b, 2021b) beschrieben.

Pseudocode 1 ALNS-T

```

1: function ALNS-T(initial solution  $s$ )
2:   solution :  $s_{best} = s$ 
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:       $s = s'$ 
return  $s_{best}$ 

```

Pseudocode 1: Adaptive Large Neighborhood Search für die Einsatzplanung mit Transfers (siehe Boden et al., 2022)

Als heuristischer Ansatz zur Generierung von Einsatzplänen aus dem Bereich FTS, wurde das Verfahren „Pickup First – Shortest Distance“ (vgl. Ho and Liu, 2009) so adaptiert, dass Transfers berücksichtigt werden können (PFSD-T). Das originäre Verfahren sieht zunächst vor, dass die Fahrzeuge des FTS die Aufnahme von Ladungsträgern bevorzugen, bis Ladungskapazitäten ausgeschöpft und keine offenen Transportaufträge verfügbar sind. Stehen für das Be- oder Entladen mehrere Stationen zur Wahl, werden jene mit dem kürzesten anzufahrenden Weg priorisiert. Auf diese Weise erfolgt eine initiale Zuordnung der Transportaufträge zu den Fahrzeugen. Während der Abarbeitung passieren die Fahrzeuge a priori platzierte Transferpunkte. Beim Erreichen wird iterativ evaluiert, ob ein Ladungsträger vom Fahrzeug am Transferpunkt hinterlegt und einem anderen Fahrzeug zugeordnet werden kann. Wird parallel ein Vorteil prognostiziert, wird der Transfer durchgeführt (vgl. Pseudocode 2). Für die Evaluierung möglicher Transfers werden nur jene Transportaufträge berücksichtigt, die sich aktuell auf dem Fahrzeug befinden. Ferner werden für den Austausch nur jene Fahrzeuge mit freien Ladungskapazitäten herangezogen. Damit ist aus Sicht des Lösens des zugrundeliegenden Optimierungsproblems der zu evaluierende Suchraum im Vergleich zum Verfahren ALNS-T erheblich eingeschränkt. Es ist zu erwarten, dass so auch größere Fahrzeugsysteme gesteuert werden können. Aufgrund der algorithmisch geringeren Anforderungen, wurde das Verfahren in Python implementiert (siehe Boden et al. 2022b).

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  $s$ 

```

Pseudocode 2: Pickup First – Shortest Distance Heuristik mit Transfers (siehe Boden et al., 2022)

Testumgebung

Die Evaluierung der Lösungsverfahren und der mit dem Konzept dynamischer Transfers erzielbaren Effekte erfolgt zunächst anhand von Testinstanzen. Testinstanzen repräsentieren eine abgeschlossene Planungsaufgabe, in der Transportaufträge von einer Flotte von Fahrzeugen auszuführen sind. Es handelt sich um ein vereinfachtes Modell, das keine stochastischen Effekte wie das Aufkommen neuer Transportaufträge oder Fahrzeugkonflikte berücksichtigt. Testinstanzen werden (wie in Abbildung 5 dargestellt) erzeugt, indem die benötigten Stationen für das Be- und Entladen, die Start- und Endpunkte der Fahrzeuge und die Transferstationen unter Berücksichtigung definierbarer Parameter randomisiert in einer Fläche angeordnet werden. Ein Parameter stellt bspw. der Mindestabstand zwischen den Be- und Entladestationen der Transportaufträge dar. Zur automatisierten Erzeugung der Testinstanzen, die Anwendung der Lösungsverfahren und die Auswertung der Experimente wurde eine Softwareumgebung entwickelt.

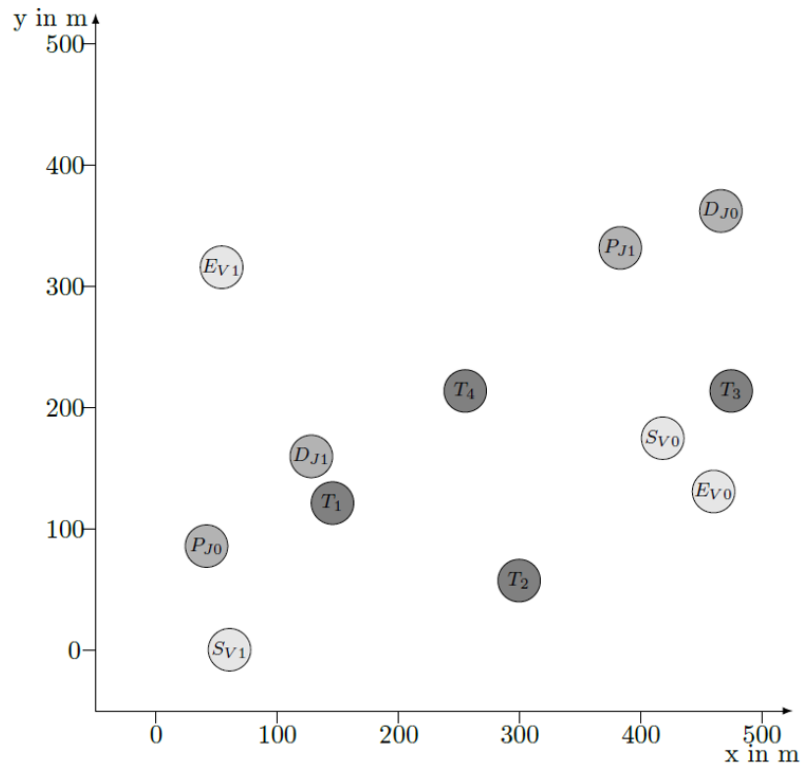


Abbildung 5: Beispiel einer Testinstanz mit 2 Fahrzeugen (V), 2 Transportaufträgen (J) und 4 Transferpunkten (T) (S...Start, E...Ende, P...Beladestation und D...Entladestation; siehe Boden et al., 2022)

Um das Konzept auch unter stochastischen Einflüssen zu evaluieren, erfolgte eine Materialflusssimulationsstudie. Hierzu wurde ein FTS mit der Simulationssoftware AutoMod modelliert. Die Lösungsverfahren ALNS-T und PFSD-T wurden durch eine TCP/IP-Verbindung mit dem Simulationsmodell gekoppelt. Auch hier wurde für die Erzeugung, Ausführung und Auswertung der Experimente eine Softwareumgebung entwickelt.

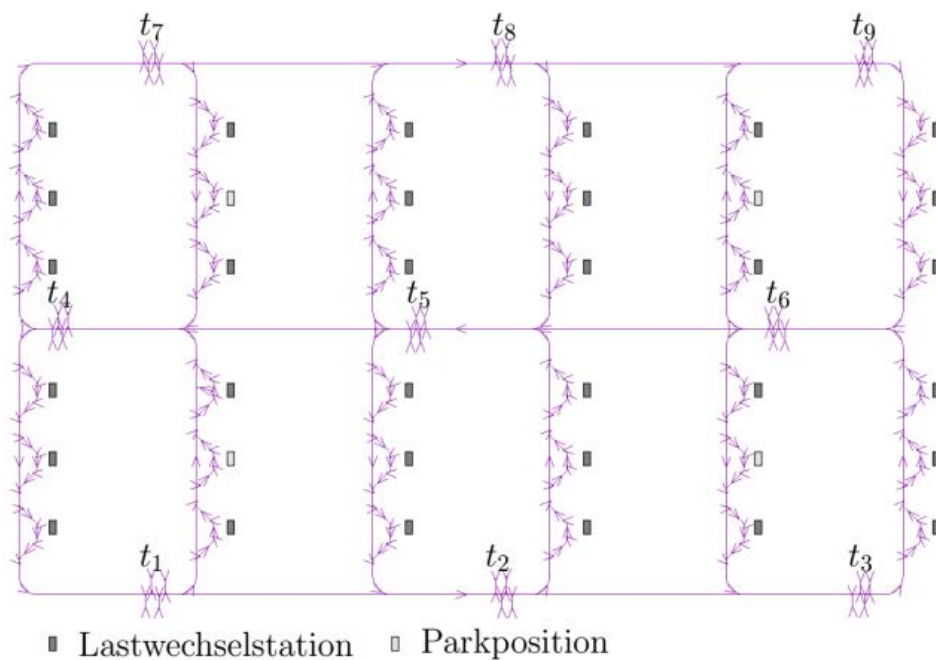


Abbildung 6: Layout der Materialflusssimulationsstudie mit 36 Lastwechselstationen, 4 Parkpositionen und 9 Transferpunkten (t) (siehe Boden et al., 2022)

Abschließend wurde die für die Durchführung der Experimente notwendige Hardware vorbereitet und Programme für die Verwaltung und Analyse der Daten entwickelt.

AP 5 Untersuchungen zur Evaluierung des Planungs- und Steuerungsansatzes und Verfahren für deren Berechnung

Ziel

Das Ziel des Arbeitspaketes liegt in der Evaluierung des Konzeptes dynamischer Ladungsträgertransfers samt der Berechnung von Einsatzplänen für den Betrieb von FTS anhand der implementierten Lösungsverfahren und repräsentativer Szenarien.

Vorgehen

Für die Evaluierung wurde zunächst ein Versuchsplan ausgearbeitet. Auf dessen Basis wurden die Lösungsverfahren anhand von Testinstanzen (repräsentieren ein spezifisches FTS mit entsprechenden Transportaufgaben/-trägern) parametrisiert und evaluiert. Anschließend wurde der Einfluss der Charakteristik der Planungsaufgabe auf die durch Transfers erzielbaren Effekte untersucht. Abschließend wurde anhand einer Materialflusssimulation geprüft, ob die herausgearbeiteten Effekte auf ein dynamisches System übertragen werden können.

Ergebnis

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse zu den Testinstanzen und der Materialflusssimulationsstudie diskutiert. Weiterführend werden die Ergebnisse in Boden et al. (2020b, 2021b, 2022b, 2022c) beschrieben.

Testinstanzen

Abbildung 7 zeigt den Einsatzplan zu der in Abbildung 5 vorgestellten Planungsaufgabe. In dieser Testinstanz werden zwei Fahrzeuge (V0 und V1) für die Ausführung von zwei Transportaufträgen (J0 und J1) eingesetzt. Der mittels der Lösungsverfahren berechnete Einsatzplan unter Berücksichtigung von Transfers sieht einen Transfer am Transferpunkt T4 vor. Werden für die Lösung keine Transfers berücksichtigt, wird Transportauftrag J0 von Fahrzeug V1 und Transportauftrag J1 von Fahrzeug V0 ausgeführt. Das Beispiel wird ausführlich in Boden et al. (2022a) beschrieben.

Die Testinstanz wurde mit dem beschriebenen mathematischen Modell in Verbindung mit dem Standardsolver CPLEX nachweislich optimal gelöst d. h., es keine bessere Lösung, auch ohne Transfers, geben kann. Damit ist zunächst nachgewiesen, dass generell das Konzept dynamischer Ladungsträgertransfers zu positiven Effekten führen können. Gegenüber der Lösung ohne Transfers, sind die Kosten zur Ausführung des berechneten Einsatzplanes im konkreten Beispiel um 18 % und die Ausführungszeit (engl. Makespan) um 14 % reduziert worden.

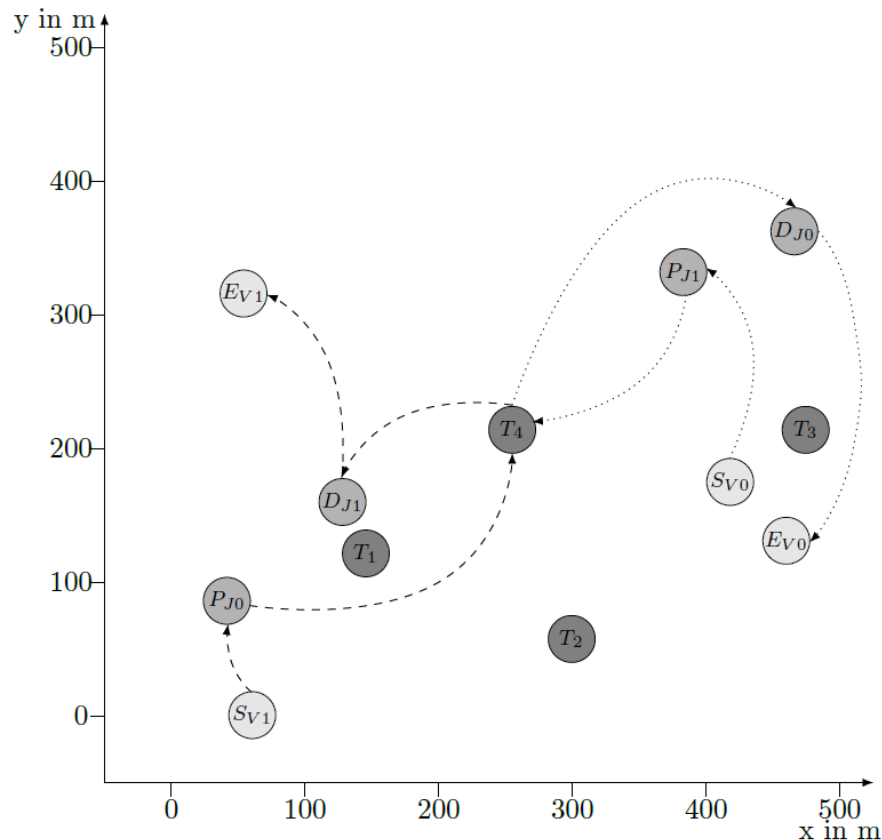


Abbildung 7 : Unter Berücksichtigung eines Transfers am Transferpunkt (T4) gelöste Testinstanz (siehe Boden et al., 2022a)

Zur Charakterisierung der Tauglichkeit der Lösungsverfahren wurde mit zu Abbildung 7 vergleichbaren Testinstanzen mit verschiedenen System- bzw. Problemgrößen gearbeitet. Die Problemgröße beschreibt den Umfang des zugrundeliegenden FTS bzw. dessen Planungsproblems und ist im Wesentlichen durch die Zahl einzuplanender Fahrzeuge und Transportaufträge gekennzeichnet. In Übereinkunft/Absprache mit Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschuss und vor dem Hintergrund realistischer/praxisnaher Szenarien, wurde die Problemgröße von 2 bis 8 Fahrzeugen und 4 bis 16 Transportaufträgen variiert. Sie hat einen wesentlichen Einfluss darauf, ob mit den verschiedenen Lösungsverfahren Einsatzpläne zweckmäßig generiert werden können.

Mittels Standardsolver konnten lediglich Lösungen für kleinste Problemgrößen mit max. 2 Fahrzeugen und 4 Transportaufträgen errechnet werden. Es wurde mit einem Zeitlimit von 50 Minuten gearbeitet. Dabei konnte für ca. 50 % der Testinstanzen eine optimale Lösung errechnet werden. Eine Übersicht zu den einzelnen Berechnungszeiten zeigt Abbildung 8. Die Mehrheit der Testinstanzen (>95%) wurde in weniger als 15 min gelöst. Es ist davon auszugehen, dass durch eine Steigerung des Zeitlimits nur einzelne Instanzen zusätzlich gelöst werden können. Das Ergebnis bestätigt die initiale Annahme, dass die Anwendung von (Standard-)Sollern keine Echtzeitanwendung zur Planung und Steuerung eines FTS möglich ist, die Generierung von Einsatzplänen sehr rechen- und damit zeitaufwendig ist. Gleichwohl können Solver für Vergleichszwecke herangezogen werden.

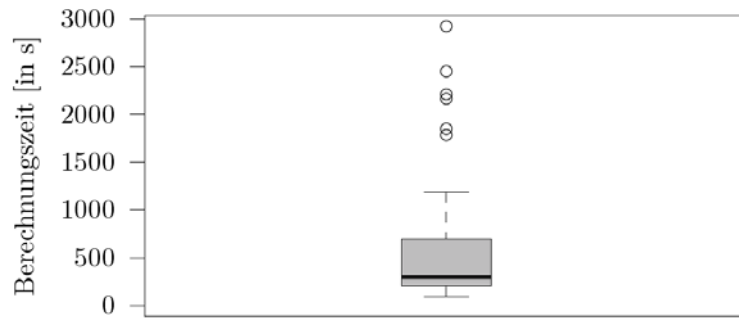


Abbildung 8: Berechnungszeiten mit dem Lösungsverfahren Standardsolver bei einer Problemgröße von 2 Fahrzeugen und 4 Transportaufträgen (siehe Boden et al., 2022c)

Ein Vergleich der mit den Lösungsverfahren berechneten Einsatzpläne ist in Abbildung 9 dargestellt. Das Zeitlimit zur Lösungsgenerierung wurde für die ALNS-T-Heuristik auf 30 s gesetzt. Diese Einschränkung ergab sich aus Voruntersuchungen und stellt einen Kompromiss zwischen Praxistauglichkeit (kurze Berechnungszeiten) und Lösungsgüte (lange Berechnungszeiten) dar. Mittels PFSD-Heuristik wurden für alle Testinstanzen Lösungen in weniger als 1 s generiert, ohne, dass explizit ein zeitliches Abbruchkriterium definiert werden musste.

Mit allen Verfahren wurden für Testinstanzen Einsatzpläne mit Berücksichtigung von Transfers gelöst bzw. gefunden. Gegenüber der Lösung ohne Transfers wurden damit positive Effekte auf die Systemleistung erzielt. Die mittlere Verbesserung betrug hierbei zwischen 4 und 7 %.

Insgesamt ist die Lösungsqualität, bezogen auf die Kosten der Einsatzpläne zwischen Solver (exakte, optimale Lösung) und ALNS (heuristische, gute, ggf. suboptimale Lösung) vergleichbar. Die Abweichung betrug weniger als 1 %. Im Gegensatz dazu, ist die Lösungsqualität der Einsatzpläne ermittelt durch die PFSD-Heuristik etwa 30 % schlechter. Das Ergebnis entspricht den initialen Erwartungen (siehe Boden et al., 2020a; Le-Anh, 2005).

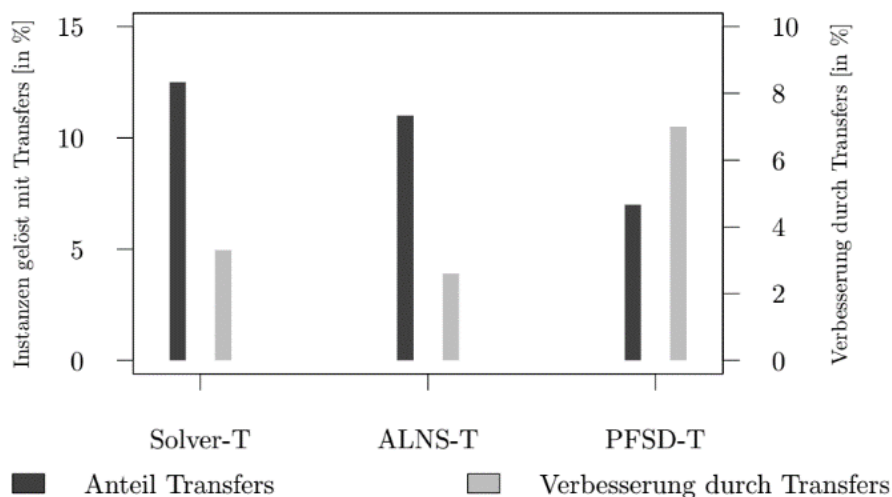


Abbildung 9: Vergleich der mit den Lösungsverfahren berechneten Einsatzpläne für die Problemgröße mit 2 Fahrzeugen und 4 Transportaufträgen (siehe Boden et al., 2022a)

Werden größere Systeme betrachtet, d. h. die Problemgröße gesteigert, ist bei Anwendung des Verfahrens ALNS erkennbar (vgl. Abbildung 10), dass weniger Einsatzpläne mit Transfers generiert werden und damit deren positiver Einfluss auf die Systemleistung sinkt. Intuitiv sollte

dagegen bei mehr Transporten und Fahrzeugen die Anzahl von Ladungsträgertransfers aufgrund potentiell günstiger Kombinationsmöglichkeiten steigen. Die Ursache für die Ergebnisse und den gegenteiligen Effekt liegt im Lösungsverfahren selbst. Hier wird iterativ versucht, die Lösung zu verbessern, wobei bei jedem Schritt ein wesentlicher Teil der Lösung neu erzeugt wird. Je größer die Anzahl möglicher Einsatzpläne (aufgrund der verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten), desto weniger Iterationen können beschränkt durch das Berechnungszeitlimit durchgeführt werden. Im Ergebnis können für kleine Problemgrößen zwar sehr gute Ergebnisse erzielt werden, eine Anwendung für größere Fahrzeugsysteme ist unter anwendungsnahen Bedingungen aber nicht möglich.

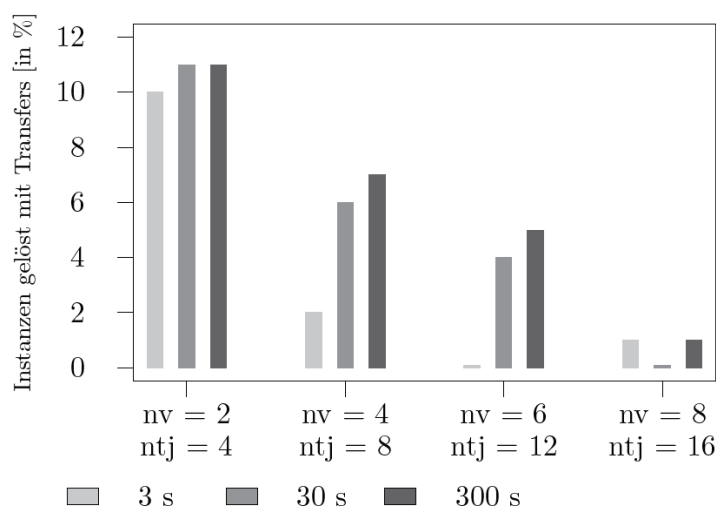


Abbildung 10: Anteil identifizierter Transfers für das Lösungsverfahren ALNS unter Variation der Problemgröße (Anzahl Fahrzeuge nv und Anzahl Transportaufträge ntj) und der zur Verfügung stehenden Berechnungszeit (siehe Boden et al., 2022c)

Mit dem Verfahren PFSD wird hingegen der erwartete Effekt erzielt (vgl. Abbildung 11): Mit zunehmender Problemgröße steigt die Zahl an Instanzen, deren Einsatzpläne Transfers aufweisen. Die mit ihnen erzielten positiven Effekte sind von der System-/Problemgröße (Zahl der auszuführenden Transportaufträge) weitestgehend unabhängig. Alle Lösungen/ Einsatzpläne wurden in jeweils weniger als 1 s berechnet. Damit ist das Verfahren potenziell auch für größere Fahrzeugsysteme geeignet.

Die bisher beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass Transfers für die Einsatzplanung im Kontext einer Echtzeitsteuerung von FTS berücksichtigt werden können. Die Lösungsverfahren ALNS-T und PFSD-T erlauben eine Berechnung von Lösungen zugrundeliegender mathematischer Optimierungsmodelle in einem kurzen Zeitintervall. Mit ihnen können Transfers identifiziert werden, die im Vergleich zu einer Einsatzplanung ohne Möglichkeit von Transfers einen positiven Effekt erzielen. Gleichzeitig ist die Zahl von Testinstanzen, für die vorteilhafte Transfers berechnet werden können gering.

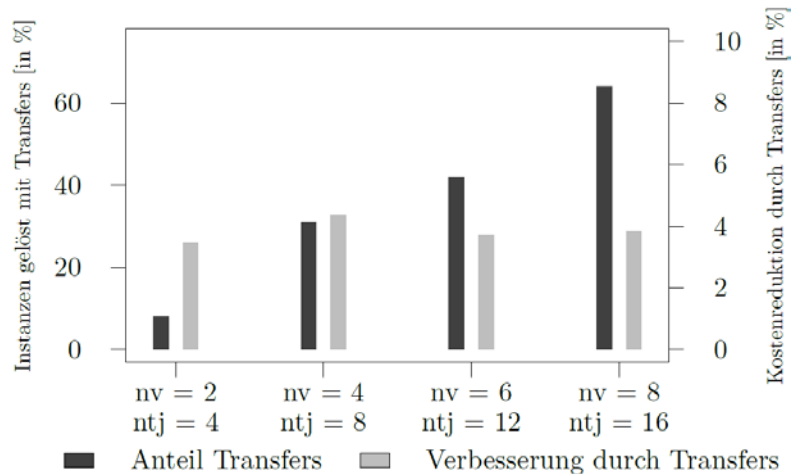


Abbildung 11: Anteil identifizierter Transfers und erzielte Kostenreduktion für das Lösungsverfahren PFSD unter Variation der Problemgröße (Anzahl Fahrzeuge nv und Anzahl Transportaufträge ntj) (siehe Boden et al., 2022c)

Es ist naheliegend, dass die Charakteristik des Transportsystems einen wesentlichen Einfluss auf die durch Transfers erzielbaren Effekte hat. Weitere Experimente waren darauf ausgelegt, den Einfluss jener relevanten Parameter herauszuarbeiten, um Systemkonfigurationen zu identifizieren, die einen höheren Nutzen versprechen.

Unter der Prämisse, dass Transfers die Systemleistung verbessern, wurden Systemparameter gesucht, deren Ausprägung eine hohe Anzahl mit sich bringen. Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse einer Analyse beispielhaft mit dem Lösungsverfahren PFSD-T. Es wird deutlich, dass die Parameter teilweise einen ausgeprägten Effekt auf die Zahl identifizierter Transfer haben. So wirken sich bspw. eine höhere Anzahl und zentrale Positionierung von Transferpunkten positiv aus. Auch eine höhere Mindestlänge der Transporte führt zu einem höheren Nutzen. Zusammenfassend erlauben die untersuchten Parameter eine Variation des Potenzials für eine Verbesserung (z. B. Transportlänge) oder der Kosten der Durchführung eines Transfers (z. B. bessere Erreichbarkeit der Transferpunkte). Die Ergebnisse werden in Boden et al. (2022b) beschrieben.

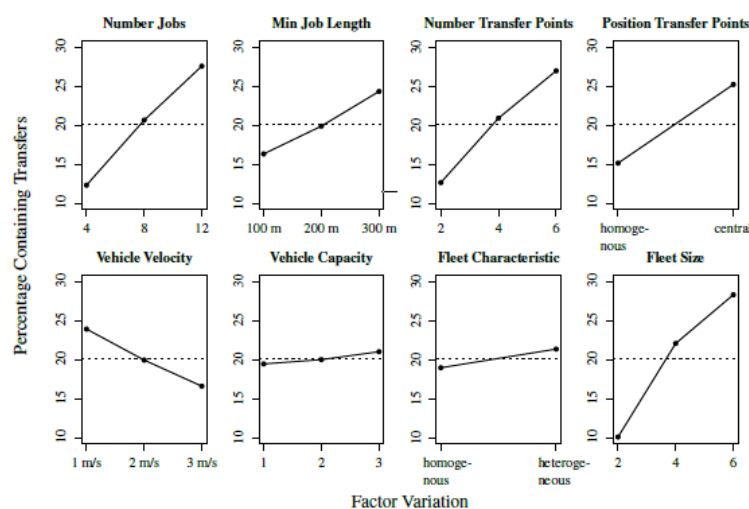


Abbildung 12: Übersicht zum Einfluss verschiedener Parameter auf den Einfluss dynamischer Transfers zur Verbesserung der untersuchten Testinstanzen (siehe Boden et al., 2022b)

Mit weiteren Experimenten konnten Systemkonstellationen identifiziert werden, welche die Durchführung von Transfers begünstigen. In Szenarien mit spurgeführten Streckennetz und „geschickt“ angeordneten Transferpunkten, konnten mehr als 50 % der untersuchten Testinstanzen von Transfers profitieren.

Materialflusssimulation

Aufbauend zu den Ergebnissen der untersuchten Testinstanzen wurde eine Materialflusssimulationsstudie durchgeführt. Ziele waren, zu zeigen, dass dynamische Transfers auch unter stochastischer Unsicherheit einen positiven Effekt erzielen können und die Ergebnisse insgesamt auf einen dynamischen Anwendungsfall übertragbar sind. Die Berücksichtigung eines Transfers in der Einsatzplanung basiert gleichfalls auf der Annahme, dass durch den Austausch von Transportaufträgen einzelner Fahrzeuge die Systemleistung gesteigert werden kann. Im Falle der a priori-Einsatzplanung, können zum Zeitpunkt der Planerstellung dynamische Ereignisse wie Fahrzeugkonflikte oder neu auftretende Transportaufträge nicht berücksichtigt werden. Diese können dazu führen, dass ein Transfer im Rückblick auch einen negativen Effekt bewirkt. Durch die Materialflusssimulation konnte herausgearbeitet werden, dass solche Fälle existieren, ihr Einfluss auf das Gesamtergebnis allerdings vernachlässigbar ist. Die Ergebnisse zeigen (vgl. Abbildung 13), dass dynamische Transfers einen positiven Effekt auf die Kosten zur Ausführung der Transportaufträge haben. Einzelne Systemkonfigurationen konnten durch Transfers eine um mehr als 5 % verbesserte Leistung erzielen.

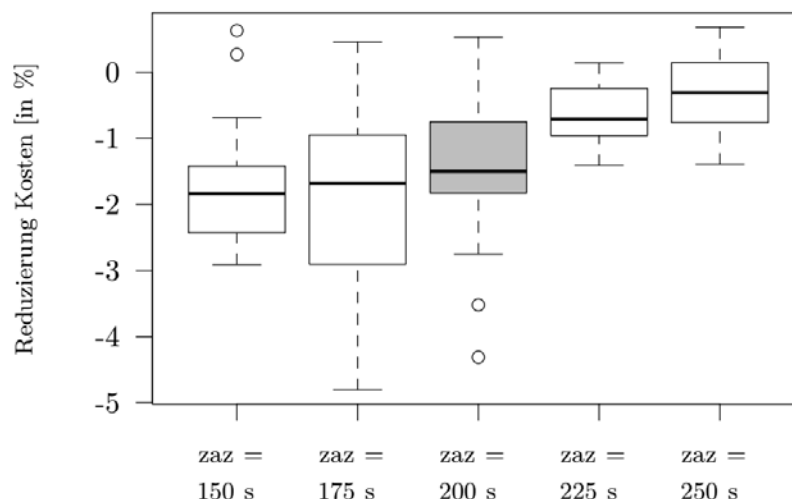


Abbildung 13: Ergebnis der Materialflusssimulation für eine Variation des Durchsatzes anhand der Zwischenankunftszeit neuer Transportaufträge (zaz) (siehe Boden et al., 2022c)

Die durchgeführten Sensitivitätsanalysen im Rahmen der Materialflusssimulation haben gezeigt, dass die hergeleiteten Erkenntnisse aus der statischen Einsatzplanung grundsätzlich auf dynamische Systeme übertragbar sind. In günstigen Szenarien konnten deutliche Effekte auf die Fahrzeugauslastung, die benötigte Fahrzeuganzahl und den erzielbaren Durchsatz erzielt werden.

AP 6 Entwicklung eines Planungswerkzeugs

Ziel

Mit dem Arbeitspaket sollen die erzielten Ergebnisse anwendertauglich aufbereitet und eine Verwertung ermöglicht werden.

Vorgehen

Analyse der Ergebnisse zur Eignung des Konzepts dynamischer Transfers zur Steigerung der Systemleistung von FTS. Evaluierung von Methoden zur Aufbereitung der Ergebnisse und Präsentation der Resultate.

Ergebnis

Die Ergebnisse zeigen, dass es einen Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Transportsystems bzw. des zu realisierenden Materialflusses und den durch dynamische Transfers erzielbaren Effekte gibt. Ein Teil der Ergebnisse wird in Abbildung 12 dargestellt. Es wird deutlich, dass bspw. die Anzahl und Position der Transferpunkte einen wesentlichen Einfluss haben.

Neben den getesteten gut abstrahierbaren Parametern zur Beschreibung der Systemcharakteristik, verbleiben erhebliche Freiheitsgrade u. a. bezogen auf die Struktur der Transportaufgaben. So ist es bspw. relevant, ob sich Transportströme kreuzen oder gleich gerichtet verlaufen. Versuche diesbzgl., sowohl verallgemeinerbare Modelle, als auch Ergebnisse zu erzielen, waren nicht erfolgreich. Auf Basis der untersuchten Parameter ist es damit nicht möglich, mit Sicherheit auf positive Effekte durch Transfers zu schließen, womit auch die Güte von Ersatzmodellen zur Bewertung des Einflusses durch dynamische Transfers, bspw. mit einer Logistischen Regression, vergleichsweise gering ist. Entsprechend ist für die Analyse des möglichen Nutzens durch dynamische Transfers eine Simulation empfehlenswert. Hierfür können Testinstanzen zu konkreten Planungssituationen erzeugt oder eine Materialflusssimulation genutzt werden. Dafür können die entwickelten Lösungsverfahren verwendet werden.

Um die Vorauswahl ggf. geeigneter System zu unterstützen, wurden die Projektergebnisse in einer Übersicht zusammengefasst – siehe Abbildung 14. Für eine erste Abschätzung sind die Potenziale für eine Verbesserung den Kosten zur Durchführung eines Transfers gegenüberzustellen. Für einen hohen Nutzen sollten entsprechend und im Wesentlichen die Längen auszuführender Transportaufträge/-wege möglichst groß sein. Gleichzeitig sollten die Kosten zur Ausführung des Transfers möglichst gering sein. Hierzu zählen insbesondere die Lastwechselzeit und die Erreichbarkeit der Transferpunkte.

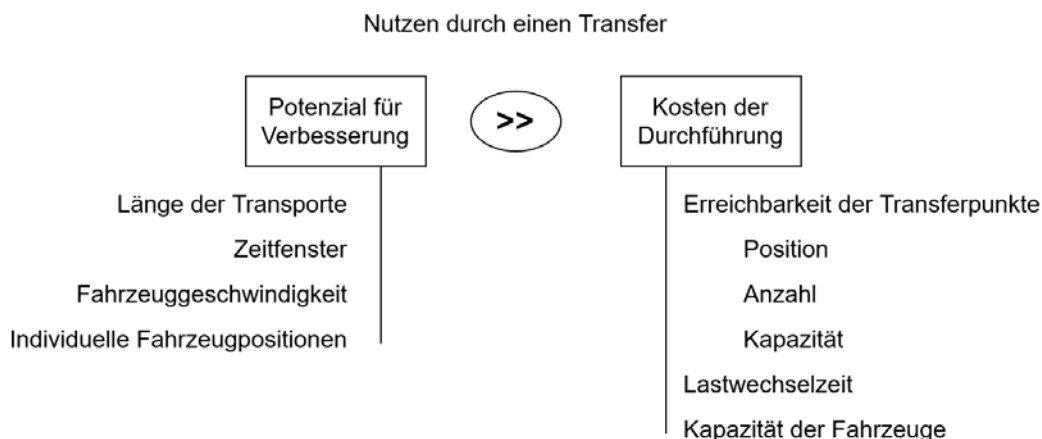


Abbildung 14: Übersicht zu relevanten Einflussfaktoren auf den durch Transfers erzielbaren Effekt

Die durchschnittliche Kostenreduktion durch Transfers lag in den Experimenten bei ca. 5 %. In Einzelfällen sind deutlich höhere Verbesserungen möglich (bis zu 50 %).

AP 7 Dissemination und Dokumentation

Ziel

Dieses Arbeitspaket dient zur Veröffentlichung der Ergebnisse, um sie einer breiten Nutzerbasis zuzuführen.

Vorgehen und Ergebnis

Es wurden die in Abschnitt 6 beschriebenen Maßnahmen durchgeführt.

3. Verwendung der Zuwendung

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Verwendung der Zuwendung für die Bearbeitung des Projektes, aufgeschlüsselt nach Arbeitspaketen (AP). Eine Übersicht zur Verwendung der Zuwendungen nach Kalenderjahr kann Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 2: Übersicht zur Verwendung der Zuwendungen für die Bearbeitung der in Abschnitt 2 beschriebenen Arbeitspakete

Arbeitspakete (AP)	Verwendung der Zuwendungen
AP 1 Identifikation und Systematisierung relevanter Systemparameter	3 PM
AP 2 Abstraktion des Steuerungsansatzes und Modellbildung	2 PM
AP 3 Identifikation und Bewertung heuristischer Lösungsverfahren	3 PM
AP 4 Implementierung Lösungsverfahren und Aufbau Testumgebung	4 PM

AP 5 Untersuchungen zur Evaluierung des Steuerungsansatzes	6 PM
AP 6 Entwicklung eines Planungswerkzeugs	1,81 PM
AP 7 Dissemination und Dokumentation	2 PM
Summe	21,19 PM

Tabelle 3: Verwendung der Zuwendungen nach Kalenderjahr

Jahr	Verwendung der Zuwendungen
2020	0 PM
2021	9,19 PM
2022	12 PM
Summe	21,19 PM

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Forschungsarbeiten sowie die dafür aufgewendeten Ressourcen waren notwendig und angemessen, um die Ziele der Arbeitspakete des Forschungsprojektes zu erreichen. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes entsprachen den Erwartungen des Projektantrags.

5. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde ein neuartiger Ansatz für die Einsatzplanung in FTS untersucht. Das Resultat ist zunächst ein konkretes Konzept für eine Realisierung dynamischer Transfers in FTS. Darauf aufbauend wurden etablierte Lösungsverfahren für die Berechnung von Einsatzplänen adaptiert, um mit ihnen eine Einsatzplanung unter Berücksichtigung dynamischer Transfers zu ermöglichen. Das Konzept und die Lösungsverfahren wurden anhand repräsentativer Modelle evaluiert.

Die Ergebnisse der Evaluierung zeigen, dass dynamische Ladungsträgertransfers positive Effekte auf die Leistungsfähigkeit eines FTS haben können. Es wurde herausgearbeitet, dass die Charakteristik der Transportaufgabe einen wesentlichen Einfluss auf den möglichen Nutzen durch Transfers hat. Anhand der Ergebnisse wurden konkrete Indikatoren als Planungshilfe herausgearbeitet.

Die Ergebnisse können von Entwicklern, Planern und Anwendern genutzt werden, um Rückschlüsse auf den Nutzen dynamischer Transfers für Realsysteme zu ziehen. Für eine Anwendung in der Steuerung eines FTS oder zur Materialflusssimulation wurden mit den Lösungsverfahren anwendbare Softwarewerkzeuge entwickelt und evaluiert. Sie können als Ausgangspunkt einer Übertragung des Konzeptes in die praktische Anwendung betrachtet werden.

6. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die für den Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft durchgeführten Maßnahmen werden in Tabelle 4 beschrieben. Als „geplant“ markierte Maßnahmen finden gegenwärtig statt.

Tabelle 4: Übersicht zu den für den Ergebnistransfer in die Wirtschaft durchgeführten Maßnahmen

Maßnahme	Beschreibung	Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	Einführung Projekt, Vorstellung Arbeitspakete, Präsentation erster Ergebnisse.	01.07.2021
Projektbegleitender Ausschuss	Abschlusspräsentation	Projektende
Internetpräsentation	https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/itla/tl	Fortlaufend im Projekt
Konferenzbeiträge	Control of hybrid AMHS considering dynamic transport load transfers between vehicles im Rahmen der 20th European Advanced Process Control and Manufacturing Conference (apc m)	04/2022
	Einsatzplanung in Fahrerlosen Transportsystemen unter Berücksichtigung von Ladungsträgertransfers im Rahmen des 18. Fachkolloquium Logistik der WGTL	09/2022
	Dispatching Automated Guided Vehicles Considering Transport Load Transfers im Rahmen der 2022 Winter Simulation Conference (WSC)	12/2022
	Automatisierte Fahrzeugsysteme für die Intralogistik – aktuelle Herausforderungen und Lösungsansätze im Rahmen des Deutschen Materialflusskongresses (eingereicht)	03/2023
Journals	Scheduling Automated Guided Vehicles considering transport load transfers in LOGISTICS RESEARCH (eingereicht)	geplant

Maßnahme	Beschreibung	Zeitraum
Beratung von Unternehmen	Im Projektverlauf sind Kontakte zu Unternehmen entstanden, denen das Projekt und die erzielten Ergebnisse vorgestellt wurden (z. B. Lödige und LG).	Fortlaufend im Projekt
Wissenschaftl. Qualifikation	Weitere Aspekte und Varianten der im Projekt identifizierten Problemstellung sollen im Rahmen einer Dissertation untersucht werden.	geplant in 2023
Übernahme der Ergebnisse in die Lehre	Verbreitung der Erkenntnisse durch Absolventen der TU Dresden.	Fortlaufend im und nach Projekt
	Bearbeitung von Teilaufgaben im Rahmen von studentischen Abschluss- und Seminararbeiten.	Fortlaufend im und nach Projekt
	Berücksichtigung der Projektergebnisse in Lehrveranstaltungen (u. a. Logistics Lab).	Fortlaufend im und nach Projekt

Literatur

- Boden, P., Hahne, H., Rank, S., Schmidt, T., 2020a. Dispatching of Multiple Load Automated Guided Vehicles Based on Adaptive Large Neighborhood Search, in: Neufeld, J.S., Buscher, U., Lasch, R., Möst, D., Schönberger, J. (Eds.), Operations Research Proceedings 2019, Operations Research Proceedings. Springer International Publishing, Cham, pp. 375–380. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48439-2_45
- Boden, P., Hahne, H., Rank, S., Schmidt, T., Hupfer, R., 2019. Applying DARP for Scheduling of Multiple-Load AGV in Semiconductor Industry Transport Systems. Presented at the Conference: 19th European advanced process control and manufacturing (apc|m) Conference, Villach.
- Boden, P., Rank, S., Schmidt, T., 2022a. Einsatzplanung in Fahrerlosen Transportsystemen unter Berücksichtigung von Ladungsträgertransfers. Logistics Journal : Proceedings 22, Issue 14.
- Boden, P., Rank, S., Schmidt, T., 2022b. Dispatching Automated Guided Vehicles Considering Transport Load Transfers, in: Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference. Presented at the 2022 Winter Simulation Conference (WSC), IEEE, Singapore, pp. 1437–1448. <https://doi.org/10.1109/WSC57314.2022.10015242>
- Boden, P., Rank, S., Schmidt, T., 2022c. Einsatzplanung in Fahrerlosen Transportsystemen unter Berücksichtigung von Ladungsträgertransfers.
- Boden, P., Rank, S., Schmidt, T., 2021a. Control of heterogenous AMHS in semiconductor industry under consideration of dynamic transport carrier transfers, in: 2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Presented at the 2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), IEEE, Valencia, Spain, pp. 1403–1408. <https://doi.org/10.1109/ICIT46573.2021.9453585>

- Boden, P., Rank, S., Schmidt, T., 2021b. Scheduling by High-Performance Computing -An example for AGV considering dynamic transport carrier transfers, in: 1st Virtual European Advanced Process Control and Manufacturing Conference (Apc|m). Virtual.
- Boden, P., Rank, S., Schmidt, T., 2020b. Modified Adaptive Large Neighborhood Search for Scheduling Automated Guided Vehicle fleets considering dynamic transport carrier transfers. *Logistics Journal : Proceedings* 20, Issue 12. https://doi.org/10.2195/LJ_PROCODEN_BODEN_EN_202012_01
- Cortés, C.E., Matamala, M., Contardo, C., 2010. The pickup and delivery problem with transfers: Formulation and a branch-and-cut solution method. *European Journal of Operational Research* 200, 711–724. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.022>
- Danloup, N., Allaoui, H., Goncalves, G., 2018. A comparison of two meta-heuristics for the pickup and delivery problem with transshipment. *Computers & Operations Research* 100, 155–171. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.07.013>
- De Ryck, M., Versteijne, M., Debrouwere, F., 2020. Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques. *Journal of Manufacturing Systems* 54, 152–173. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.12.002>
- Hincapie-Potes, S., Lesmes-Ramirez, C., 2018. Pickup and Delivery Problem with Transfers. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1803.03907>
- Ho, Y.-C., Liu, H.-C., 2009. The performance of load-selection rules and pickup-dispatching rules for multiple-load AGVs. *Journal of Manufacturing Systems* 28, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2009.06.001>
- Le-Anh, T., 2005. Intelligent Control of Vehicle-Based Internal Transport Systems (PhD Thesis). Erasmus University, Rotterdam.
- Masson, R., Lehuédé, F., Péton, O., 2012. Simple Temporal Problems in Route Scheduling for the Dial-a-Ride Problem with Transfers, in: Hutchison, D., Kanade, T., Kittler, J., Kleinberg, J.M., Mattern, F., Mitchell, J.C., Naor, M., Nierstrasz, O., Pandu Rangan, C., Steffen, B., Sudan, M., Terzopoulos, D., Tygar, D., Vardi, M.Y., Weikum, G., Beldiceanu, N., Jussien, N., Pinson, É. (Eds.), *Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 275–291. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29828-8_18
- Mitrović-Minić, S., Laporte, G., 2006. The Pickup And Delivery Problem With Time Windows And Transshipment. *INFOR: Information Systems and Operational Research* 44, 217–227. <https://doi.org/10.1080/03155986.2006.11732749>
- Qu, Y., Bard, J.F., 2012. A GRASP with adaptive large neighborhood search for pickup and delivery problems with transshipment. *Computers & Operations Research* 39, 2439–2456. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.11.016>
- Rais, A., Alvelos, F., Carvalho, M.S., 2014. New mixed integer-programming model for the pickup-and-delivery problem with transshipment. *European Journal of Operational Research* 235, 530–539. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.038>
- Sampaio, A., Savelsbergh, M., Veulenturf, L.P., Van Woensel, T., 2020. Delivery systems with crowd-sourced drivers: A pickup and delivery problem with transfers. *Networks* 76, 232–255.
- Ullrich, G., 2014. *Fahrerlose Transportsysteme: eine Fibel - mit Praxisanwendungen - zur Technik - für die Planung ; mit zahlreichen Tabellen, 2., überarb. und erw. Aufl. ed.* Springer Vieweg, Wiesbaden.