

Fahrzeugkoordination und -konfiguration in Hochleistungs-Shuttle-Systemen

Vehicle Coordination and Configuration in high-powered Automated Vehicle Storage and Retrieval Systems

Andreas Habl, Thomas Lienert, Germain Pradines, Johannes Fottner,
Technische Universität München, München (Germany), andreas.habl@tum.de,
thomas.lienert@tum.de, germain.pradines@tum.de, j.fottner@tum.de

Abstract: The growing demand for increased flexibility and throughput capacity of automated warehouses is driving the implementation of rail guided automated vehicle storage and retrieval systems (AVSRS). However, a new type of AVSRS is capable of further increased performance by utilizing multiple vehicles along one rail instead of using only a single vehicle per aisle and tier. In this work, we introduce the shuttle vehicle scheduling problem (SVSP) in AVSRS and present methods to solve the SVSP. We conduct a series of simulation experiments to show the performance improvement of horizontal transportation in this new type of AVSRS using different configurations and discuss main benefits of deploying high-powered AVSRS.

1 Einführung

Shuttle-Systeme bilden eine flexible und leistungsfähige Möglichkeit zur automatisierten Lagerung kleiner Transporteinheiten. Aufgrund der vollständigen Entkopplung von Horizontal- und Vertikaltransport erzielen Shuttle-Systeme mit gassen- und ebenengebundenen Shuttle-Fahrzeugen in Verbindung mit Behälterliften die höchste Durchsatzleistung. In dieser Systemvariante sind je nach Lagergeometrie – d. h. Anzahl der Ebenen und Länge der Gassen – entweder die Lift- oder die Shuttle-Fahrzeuge das durchsatzbegrenzende Transportmittel (Eder und Kartnig 2016). Mit dem Einsatz weiterer Shuttle-Fahrzeuge je Gasse und Ebene sowie weiterer Lift-Fahrzeuge je Schacht lässt sich eine zusätzliche Durchsatzsteigerung in solchen Systemen erreichen – wenn die Koordination von mehreren Fahrzeugen in derselben Gasse bzw. im selben Schacht gelingt. Dadurch entsteht eine neue Variante von Shuttle-Systemen im Hochleistungsbereich, die den steigenden Anforderungen hinsichtlich Dynamik und Flexibilität von automatisierten Lagersystemen gerecht werden kann. Denn neben der erhöhten Durchsatzleistung von neu geplanten Hochleistungs-Shuttle-Systemen können auch Bestandssysteme durch den Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge flexibel und aufwandsarm angepasst werden, um auf veränderte Randbedingungen zu reagieren.

In dieser Arbeit wird das Potential von Hochleistungs-Shuttle-Systemen anhand des Horizontaltransports in einer Ebene einer Lagergasse vorgestellt. Zunächst wird ein Überblick über bereits existierende Forschungsliteratur im Bereich von Shuttle-Systemen gegeben und es werden insbesondere Arbeiten im Hochleistungsbereich aufgezeigt. Um einen robusten und gleichzeitig effizienten Betrieb mehrerer Shuttle-Fahrzeuge in einer Gassenebene bzw. in einem Schienensystem zu realisieren, sind Strategien zur Steuerung der Fahrzeuge notwendig. Nach der Problembeschreibung werden daher mögliche Strategien vorgestellt und anhand eines konkreten Steuerungsalgorithmus verdeutlicht. Die Umsetzung dieser Steuerung in ein Simulationsmodell erlaubt die darauffolgende Leistungsuntersuchung einer Gassenebene unter Variation der Fahrzeug- und Liftkonfiguration.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Die mit der Konfiguration bzw. Auslegung einhergehende Durchsatzberechnung von Shuttle-Systemen ist Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen und kann entweder mithilfe von analytischen oder simulationsbasierten Modellen erfolgen. So beinhaltet die FEM-Regel 9.860 ein analytisches Modell zur Durchsatzberechnung von Shuttle-Systemen mit Fahrzeug- und Behälterliften. Insbesondere werden Spezialfälle wie die doppeltiefe Lagerung oder der Einsatz von mehreren Behälterliften in der Gasse berücksichtigt (FEM 9860). Marchet et al. (2012) und Eder und Kartnig (2016) entwickeln jeweils ein analytisches Modell für Shuttle-Systeme mit Behälterliften und einem Shuttle-Fahrzeug je Gasse und Ebene. Die Modellierung der einzelnen Ebenen basiert auf Warteschlangensystemen und wird mittels ereignisdiskreter Simulation validiert. Die analytische Bestimmung des Durchsatzes ist daher eine geeignete Methode, findet jedoch hauptsächlich bei einfach aufgebauten Systemen Verwendung.

Trummer und Jodin (2014) präsentieren ein Berechnungstool, welches mithilfe der Monte-Carlo-Simulation die Durchsatzberechnung verschiedener Lagerkonfigurationen ermöglicht. Zhao et al. (2016) stellen ein Simulationsmodell vor, mit dem es möglich ist, unterschiedliche Regalkonfigurationen mit mehreren Liften je Gasse in kurzer Zeit zu untersuchen, um die optimale Konfiguration zu identifizieren. Lerher et al. (2015) führen eine Simulationsstudie durch, um Auswirkungen verschiedener Einflussgrößen auf den erzielbaren Durchsatz von Shuttle-Systemen mit Behälterliften zu untersuchen. Eine simulationsbasierte Durchsatzberechnung kommt also zunehmend zum Einsatz, falls eine Vielzahl an Konfigurationen und komplexere Shuttle-Systeme untersucht werden.

Grundsätzlich wird die Durchsatzleistung von Shuttle-Systemen maßgeblich von deren Steuerung beeinflusst. Insbesondere bei einfach konfigurierten Shuttle-Systemen mit Behälterliften erfordern die Transportprozesse jedoch oftmals keine komplexen Steuerungen, bzw. können diese durch einfache Prioritätsregeln festgelegt werden. Eine Ausnahme bildet das von Carlo und Vis (2012) betrachtete Shuttle-System mit Behälterliften mit jeweils zwei Lift-Fahrzeugen, die sich im selben Liftschacht fortbewegen. Die Steuerung der Fahrzeuge erfolgt über eine Blocksequenzierung, die mithilfe einer Heuristik die Transportauftragsreihenfolge optimiert. Zhao et al. (2018) greifen den Ansatz auf und ergänzen diesen, indem sie Beschleunigungs- und Bremsvorgänge der Fahrzeuge berücksichtigen. Bei Liftkonfigurationen mit mehr als einem Lift-Fahrzeug pro Schacht stoßen einfache

Prioritätsregeln an ihre Grenzen und es werden komplexere Steuerungsstrategien benötigt, die einen effizienten und gleichzeitig robusten Betrieb ermöglichen.

Shuttle-Systeme mit mehreren Fahrzeugen je Gasse und Ebene wurden in der Literatur bislang weder hinsichtlich des erzielbaren Durchsatzes, noch der notwendigen Steuerungsstrategien betrachtet.

3 Koordination mehrerer Shuttle-Fahrzeuge in einer Gassenebene

Die Koordination von mehreren Shuttle-Fahrzeugen in einer Gassenebene stellt für die Steuerung eine Herausforderung dar. Nachfolgend werden die damit einhergehende Problemstellung sowie Lösungsansätze dargestellt und abschließend wird der gewählte Steuerungsalgorithmus beschrieben.

3.1 Problemstellung

In Hochleistungs-Shuttle-Systemen stehen für den Horizontaltransport in den einzelnen Ebenen einer Gasse mehrere Shuttle-Fahrzeuge, die auf demselben Schienensystem verfahren, zur Verfügung. Um robuste Transportprozesse gewährleisten zu können, ist es notwendig, die Shuttle-Fahrzeuge derart zu koordinieren, dass Blockaden und Zusammenstöße verhindert werden. Gleichzeitig muss durch die Steuerung sichergestellt werden, dass Wartezeiten und Leerfahrten minimiert und somit die Transportprozesse effizient gestaltet werden. Diese Herausforderung, welche wir als Shuttle Vehicle Scheduling Problem (SVSP) definieren, unterteilt sich in die drei aufeinanderfolgenden Problemstellungen der Auftragszuweisung, -sequenzierung und -ausführung bzw. Wegfindung der Shuttle-Fahrzeuge. Während das vorgestellte SVSP noch nicht betrachtet worden ist, findet sich mit dem Crane Scheduling Problem (CSP) ein vergleichbares Scheduling-Problem, welches im Bereich der Steuerung von Portal- und Brückenkränen auftritt und bereits oftmals in der Literatur behandelt worden ist. Neben dem CSP kann auch das SVSP als Spezialfall der allgemeinen Maschinenbelegungsplanung betrachtet werden – es lässt sich somit den NP-schweren Problemen zuordnen und äquivalent formulieren (MacCarthy und Liu 1993):

Es müssen n Aufträge $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ abgearbeitet werden, wobei m Shuttle-Fahrzeuge $\{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ zur Verfügung stehen.

Grundsätzlich zielt die Optimierung auf die Minimierung der Bearbeitungsdauer der betrachteten Aufträge und somit auf die Maximierung des Durchsatzes in der Gassenebene ab. Im Rahmen des SVSP müssen daher die folgenden Fragestellungen beantwortet werden:

- Welchen Shuttle-Fahrzeugen ist es grundsätzlich erlaubt bzw. möglich, den jeweiligen Auftrag auszuführen? (Vorauswahl der Shuttle-Fahrzeuge)
- Welches Shuttle-Fahrzeug übernimmt welchen Auftrag und in welcher Sequenz bzw. zu welchem Zeitpunkt? (Zuordnung der Aufträge zu den Shuttle-Fahrzeugen)

3.2 Lösungsansätze für das Shuttle Vehicle Scheduling Problem

Zur Lösung des SVSP in der Gassenebene greifen wir insbesondere auf Arbeiten im Bereich des CSP zurück. Kemme (2011) evaluiert und klassifiziert die möglichen Strategien zur Vorauswahl und Zuordnung (vgl. Abbildung 1). Übertragen auf das SVSP in der Gassenebene lassen sich insbesondere folgende Strategien zur Vorauswahl formulieren:

- Ortsbezogene Einschränkung: Die Ebene der Gasse wird in Zonen unterteilt, die den einzelnen Shuttle-Fahrzeugen zugeordnet werden. Zonenübergreifende Aufträge können somit nur von mehreren Fahrzeugen vollständig bearbeitet werden.
- Aufgabenbezogene Einschränkung: Shuttle-Fahrzeuge sind entweder für die Ver- und Entsorgung eines oder mehrerer Lifte zuständig oder führen assistierende Transportaufgaben, wie etwa Umlagerungen bzw. vorbereitende Transporte aus.
- Keine Einschränkung: Alle Aufträge können von allen Shuttle-Fahrzeugen bearbeitet werden.

Die Vorauswahl ordnet jeden Auftrag a_i der Auftragsliste A allen Shuttle-Fahrzeugen, welche diesen grundsätzlich ausführen können, zu. Dadurch erhält jedes Shuttle-Fahrzeug s_j eine Menge an Aufträgen $a_i \dots a_j \in A$, wobei je nach Vorauswahlstrategie sich die einzelnen Mengen überschneiden können. Auf dieser Basis erfolgt der zweite Schritt, in welchem mithilfe einer geeigneten Zuordnungsmethodik die Aufträge den Shuttle-Fahrzeugen fest zugewiesen werden und die Reihenfolge für die Auftragsbearbeitung bzw. -sequenz je Fahrzeug festgelegt wird.

Nach Kemme (2011) kann die Auftragszuordnung mithilfe einer Blocksequenzierung oder einer dynamischen Sequenzierung erfolgen, wobei sowohl das Konzept der Blocksequenzierung als auch der dynamischen Sequenzierung in Verbindung mit der rollierenden Ablaufplanung entweder auf optimale Lösungsverfahren oder auf Näherungslösungen durch Heuristiken beruht. In beiden Fällen wird eine definierte Anzahl an Aufträgen parallel geplant (simultane Zuordnung). Der Einsatz optimaler Methoden, wie beispielsweise das Branch-and-Bound-Verfahren, garantiert das Finden des kürzesten Ablaufplans für die jeweils betrachteten Aufträge. (Meta-) Heuristiken zielen hingegen darauf ab, eine Lösung möglichst nah am Optimum in akzeptabler Rechenzeit zu erhalten (MacCarthy und Liu 1993).

Ein weiterer Ansatz besteht in der Verwendung von Prioritätsregeln im Bereich der dynamischen Sequenzierung. In diesem Fall wird stets nur der nächste Auftrag einem Shuttle-Fahrzeug zugewiesen (sukzessive Zuordnung), welches

- bislang am wenigsten genutzt wurde,
- als nächstes seinen aktuellen Auftrag abschließt und frei wird,
- sich am nächsten am Auftragsstartort befindet,
- zufällig gewählt wird.

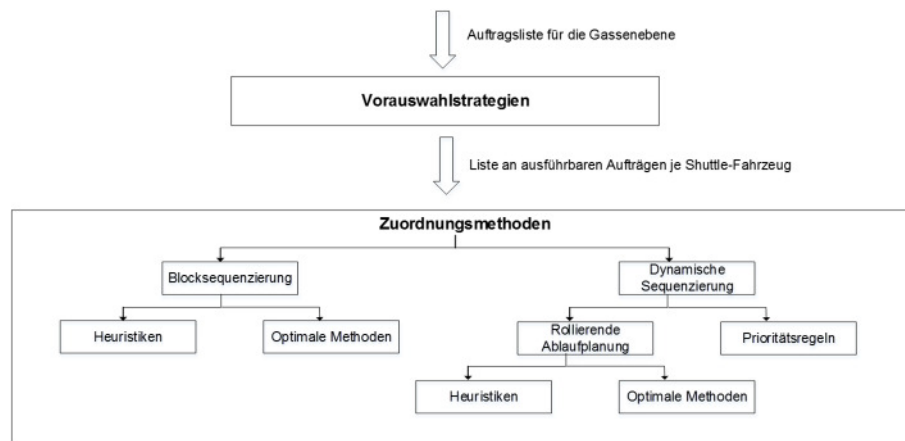


Abbildung 1: Klassifikation von Strategien zur Lösung des Scheduling-Problems, in Anlehnung an (Kemme, 2011)

3.3 Steuerungsalgorithmus zur Koordination mehrerer Shuttle-Fahrzeuge

Die Untersuchung einer potentiellen Leistungssteigerung innerhalb der Gassenebene eines Shuttle-Systems erfordert zunächst die Auswahl und Umsetzung eines Steuerungsalgorithmus. Hierfür wird als Vorauswahlstrategie keine Einschränkung gewählt, sodass jedes Shuttle-Fahrzeug jeden Auftrag in der Gassenebene ausführen kann (siehe Abschnitt 3.2). Für die Auftragszuordnung wird auf eine Blocksequenzierung nach Peterson et al. (2014) zurückgegriffen, welche ursprünglich zur Steuerung von Brückenkränen entwickelt wurde und nun auf die Anwendung in der Gassenebene von Hochleistungs-Shuttle-Systemen übertragen wird.

3.3.1 Funktionsweise

Basierend auf der Blocksequenzierung wird je nach gewählter Blockgröße eine entsprechende Anzahl an Aufträgen parallel geplant (Auftragszuordnung) und anschließend durch die Shuttle-Fahrzeuge ausgeführt. Nachdem der letzte Auftrag abgeschlossen ist, wird der Auftragsblock aus der Auftragsliste entfernt und in der nächsten Iteration der nächste Block geplant.

3.3.2 Auftragszuordnung

Die Auftragszuordnung eines Auftragsblocks besteht aus der Zuweisung eines Auftrags zu einem Shuttle-Fahrzeug mit anschließender Sequenzierung durch die Bestimmung einer Startzeit für diesen Auftrag. Daraufhin wird durch den Algorithmus iterativ ein Lösungsbaum aufgespannt, dessen Knoten alle möglichen, partiellen Ablaufpläne beinhalten. Es wird in jeder Iteration versucht, weitere Paare (Shuttle-Fahrzeug, Auftrag) zu den bestehenden Knoten hinzuzufügen und den neu erzeugten Knoten anzuhängen, bis der jeweilige Ablaufplan vollständig ist. Die vollständigen Ablaufpläne entsprechen den Blättern des Lösungsbaumes und repräsentieren die durchführbaren Kombinationen der Paare. Abschließend wird derjenige Ablaufplan für die Auftragsausführung ausgewählt, welcher vollständig ist und die geringste Bearbeitungszeit benötigt. Die folgende Abbildung 2 zeigt ein einfaches Beispiel mit der Zuordnung von zwei Aufträgen zu zwei Shuttle-

Fahrzeugen. In der ersten Iteration ergeben sich vier Möglichkeiten, einen Auftrag einem Shuttle-Fahrzeug zuzuweisen. Für die nächste Iteration wird der Knoten mit der geringsten Bearbeitungszeit ausgewählt (Ablaufplan 1) und durch zwei Zuordnungsalternativen vervollständigt. Anschließend erfolgt ein analoges Vorgehen für Knoten 3 und 4. Knoten 2 hingegen wird nicht mehr weiterverfolgt, da dieser von Ablaufplan 1.2 dominiert wird. Abschließend wird der Ablaufplan mit der geringsten Bearbeitungszeit ausgewählt (Ablaufplan 1.2) und der Ausführung übergeben.

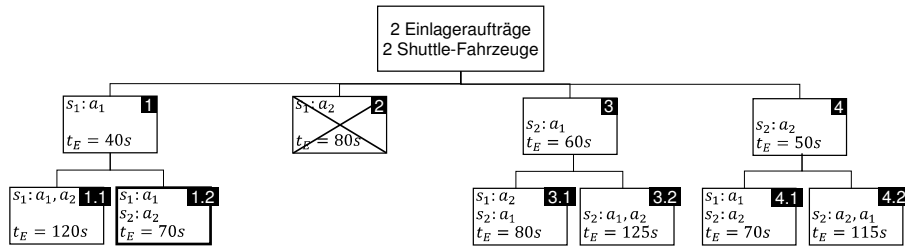


Abbildung 2: Beispielhafter Lösungsbaum mit zwei Aufträgen und zwei Shuttle-Fahrzeugen

3.3.3 Auftragsausführung

Nach der Planung eines Auftragsblockes erfolgt die Ausführung durch die Shuttle-Fahrzeuge. Für jeden Auftrag wird zunächst bestimmt, ob dieser sofort ausgeführt werden kann oder ob Wartezeiten eingehalten werden müssen, um Blockaden mit anderen Shuttle-Fahrzeugen zu verhindern. Bei sofortiger Ausführung des Auftrages erfolgt die Trajektorienplanung und Fahrt zum Startort des Auftrages. Andernfalls müssen zunächst ein oder mehrere Wartepositionen bzw. Zwischenhalte bestimmt und angefahren werden, um Behinderungen von anderen Shuttle-Fahrzeugen zu vermeiden.

3.3.4 Angewandte Heuristik

Die Anzahl möglicher Lösungen bzw. Ablaufpläne wächst exponentiell mit der Blockgröße und lässt entsprechend den Rechenaufwand ansteigen. Zur Begrenzung der Rechenzeit wird eine Heuristik eingesetzt, die im Rahmen des Scheduling-Prozesses

- unvollständige Ablaufpläne, deren Bearbeitungszeit bereits größer als die eines vollständigen Ablaufplans ist, streicht und nicht mehr weiterverfolgt (vgl. Abbildung 2)
- ab einer definierten Knotenmenge eine definierte Anzahl der Knoten vom Baum entfernt. Dabei werden diejenigen Knoten bzw. Ablaufpläne entfernt, welche die geringste Anzahl an geplanten Aufträgen enthalten oder – falls die Auftragsanzahl identisch ist – eine höhere Bearbeitungszeit benötigen.

4 Simulationsbasierte Analyse

Zur Untersuchung der Durchsatzleistung einer Gassenebene innerhalb eines Hochleistungs-Shuttle-Systems wurde mithilfe der ereignisdiskreten Simulationsumgebung Plant Simulation ein Simulationsmodell erstellt. Das Modell erlaubt

verschiedene Konfigurationen der Gassenebene und wird anschließend beschrieben. Darauffolgend werden die Ergebnisse vorgestellt und bewertet.

4.1 Simulationsmodell und -parameter

Das erstellte Simulationsmodell bildet eine Ebene einer Gasse innerhalb des Shuttle-Systems ab und weist die folgenden Bestandteile auf (siehe Abbildung 3):

- Regalsystem mit Lagerfächern (frei oder durch eine Transporteinheit belegt)
- Schienensystem mit einer Verlängerung zu beiden Seiten der Gasse für Ausweichmanöver der Fahrzeuge (Ausweichpuffer)
- Shuttle-Fahrzeuge (kinematische Parameter angelehnt an (FEM 9860))
- Liftsysteme mit jeweils zwei Übergabepuffer für die Ein- bzw. Auslagerung

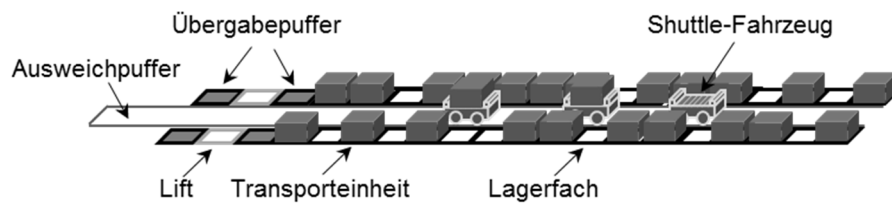


Abbildung 3: Ausschnitt einer Ebene in der Gasse eines Hochleistungs-Shuttle-Systems

Die im Rahmen der Simulationsstudie untersuchten Konfigurationen der Gassenebene sind Tabelle 1 zu entnehmen. Die aufgeführten Konfigurationen enthalten 200 Lagerfächer (je 100 Lagerfächer in Gassenlängsrichtung) und unterscheiden sich anhand der Anzahl der eingesetzten Lifte sowie deren Positionierung innerhalb der Gasse.

Tabelle 1: Betrachtete Konfigurationen der Gassenebene

Konfiguration	Liftnzahl	Liftposition	Lagerfachanzahl
1	2	Gassenanfang	200
2	2	Gassenmitte	200
3	4	Gassenanfang und -mitte	200
4	4	Gassenanfang und -ende	200

Für die simulationsbasierte Durchsatzanalyse wird in jeder Konfiguration die Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge von 1 bis 5 variiert. Die daraus resultierenden 20 Experimente werden jeweils mit fünf Replikationen durchgeführt.

4.2 Ergebnisse

Nachfolgend werden die im Rahmen der Simulationsstudie erzielten Ergebnisse vorgestellt. Hierbei wird die Durchsatz- bzw. Leistungssteigerung in Abhängigkeit der eingesetzten Fahrzeuge sowie der Konfiguration der Gassenebene betrachtet.

4.2.1 Vergleich verschiedener Konfigurationen

Abbildung 4 zeigt die für jede Konfiguration erzielten Durchsätze in Abhängigkeit der Anzahl der eingesetzten Shuttle-Fahrzeuge. Grundsätzlich steigt in allen untersuchten Konfigurationen der Durchsatz in der Gassenebene durch den Einsatz zusätzlicher Shuttle-Fahrzeuge zunächst an und nimmt ab vier bzw. fünf eingesetzten Shuttle-Fahrzeugen wieder ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit steigender Fahrzeuganzahl notwendige Ausweichmanöver, insbesondere an den Liften, zunehmen. Obwohl nicht benötigte Fahrzeuge auf den Ausweichpuffern abgestellt werden könnten und sich somit die Durchsatzleistung durch die weitere Erhöhung der Fahrzeuganzahl nicht verringern sollte, wird diese Möglichkeit durch die Heuristik in der Ablaufplanung nicht berücksichtigt.

Durch die Positionierung der zwei Lifte in der Gassenmitte (Konfiguration 2) können die Shuttle-Fahrzeuge die Lifte von beiden Seiten ohne zeitaufwändige Ausweichmanöver anfahren, sodass sich in dieser Konfiguration durchgehend der höchste Durchsatz einstellt. Mit zwei Liften am Gassenanfang kommt es zu deutlich längeren Wegstrecken und größeren Behinderungen zwischen den Shuttle-Fahrzeugen an den Liften, sodass Konfiguration 1 den geringsten Durchsatz aufweist. Eine leichte Durchsatzsteigerung stellt sich ein, sobald neben den zwei Liften am Gassenanfang zwei weitere Lifte am Gassenende (Konfiguration 4) eingesetzt werden. Eine zusätzliche Anhebung des Durchsatzes lässt sich durch die Positionierung der zwei zusätzlichen Lifte in der Gassenmitte (Konfiguration 3) erzielen, da äquivalent zu Konfiguration 1 die Lifte wieder von beiden Seiten von den Shuttle-Fahrzeugen angefahren werden können.

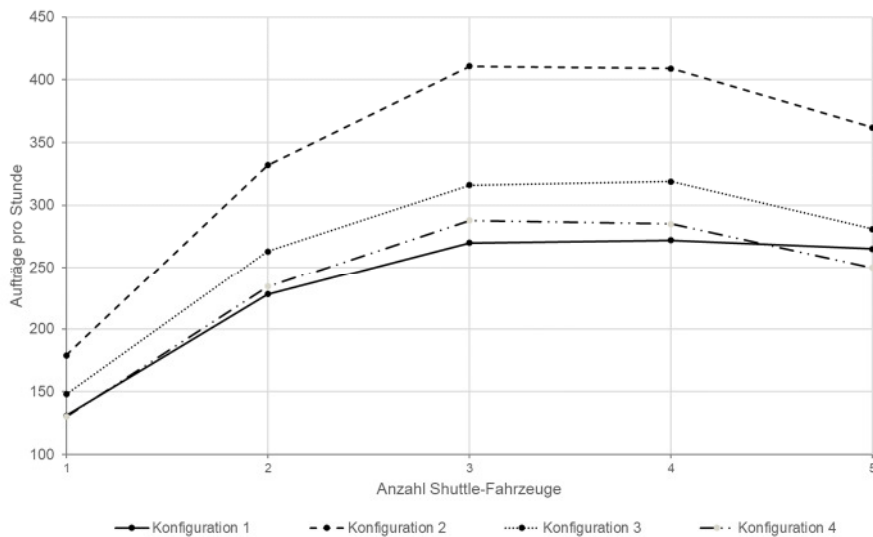


Abbildung 4: Erzielter Durchsatz in Abhängigkeit der Anzahl an Shuttle-Fahrzeugen und Konfiguration der Gassenebene

4.2.2 Leistungssteigerung durch zusätzliche Shuttle-Fahrzeuge

In Abbildung 5 ist die Leistungssteigerung bei der jeweiligen Fahrzeuganzahl anhand der durchsatzstärksten Konfiguration 2 dargestellt. Folglich lässt sich mit dem Einsatz eines zusätzlichen Shuttle-Fahrzeugs der Durchsatz um 85 % gegenüber dem Betrieb mit einem Shuttle-Fahrzeug anheben und daher den größten relativen Durchsatzgewinn erzielen. Weitere Shuttle-Fahrzeuge erhöhen den Durchsatz in abnehmendem Maße (Fahrzeuganzahl von 3: 24 % gegenüber dem Einsatz von zwei Fahrzeugen, Fahrzeuganzahl von 4: 0 % gegenüber dem Einsatz von drei Fahrzeugen) bis bei einer Fahrzeuganzahl von 5 schließlich eine Verringerung der Durchsatzleistung auftritt.

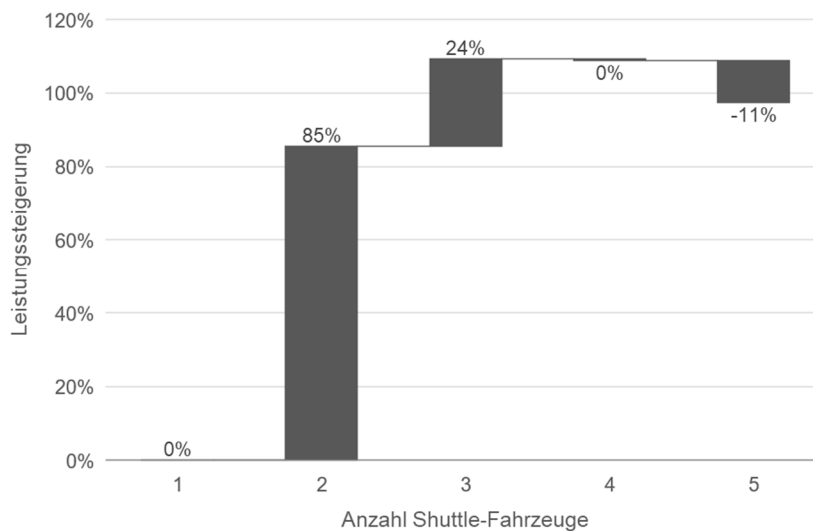


Abbildung 5: Leistungssteigerung durch den Einsatz zusätzlicher Shuttle-Fahrzeuge je Gassenebene in Konfiguration 2

5 Zusammenfassung und Ausblick

Hochleistungs-Shuttle-Systeme stellen eine neue Ausprägung von Shuttle-Systemen dar, die sich durch eine erhöhte Flexibilität und Dynamik auszeichnen. Allerdings stellen diese Systeme weitaus höhere Anforderungen an die Steuerung, sodass in dieser Arbeit das SVSP eingeführt wurde und Lösungsansätze auf Basis bereits existierender Literatur in der Ablaufplanung von Portal- und Brückenkränen präsentiert wurden. Mithilfe des umgesetzten Steuerungsalgorithmus konnte innerhalb einer Simulationsstudie aufgezeigt werden, dass durch den Einsatz von mehreren Shuttle-Fahrzeugen in der Gassenebene der Durchsatz erheblich gesteigert werden kann. Je nach Konfiguration der Gassenebene, nimmt der Durchsatz ab einer entsprechenden Anzahl eingesetzter Shuttle-Fahrzeuge wieder ab. Auch wenn die angewandte Heuristik eine vollständige Enumeration und den exponentiellen Anstieg des Lösungsraums begrenzt, erfordert der Steuerungsalgorithmus durch die Blocksequenzierung lange Rechenzeiten, insbesondere mit steigender Blockgröße und Anzahl an Shuttle-Fahrzeugen. Weitere Steuerungsalgorithmen könnten hier durch alternative Lösungsmethoden Abhilfe schaffen und gleichzeitig die

Echtzeitfähigkeit der Ablaufplanung ermöglichen, sodass in der industriellen Praxis verstärkt darauf zurückgegriffen werden kann. Wie anhand der durchgeführten Simulationsstudie gezeigt wurde, haben die Anzahl und Positionierung der Lifte innerhalb der Gasse einen entscheidenden Einfluss auf den Grad der Leistungssteigerung. Äquivalent zum Horizontaltransport kann auch die Leistungsfähigkeit des Vertikaltransports durch den Einsatz mehrerer Lift-Fahrzeuge je Liftschacht verbessert werden. Da auch hier das SVSP in abgewandelter Form auftritt, können grundsätzlich dieselben Steuerungsalgorithmen angewendet werden. Eine Schlüsselrolle kommt hier jedoch der Schnittstelle zwischen Horizontal- und Vertikaltransport zu, da diese aufeinander abgestimmt werden müssen.

Literatur

- Carlo, H.J.; Vis, I.F.A.: Sequencing dynamic storage systems with multiple lifts and shuttles. *International Journal of Production Economics* 140 (2012), S. 844–853.
- Eder, M.; Kartnig, G.: Durchsatzoptimierung von Shuttle-Systemen mithilfe eines analytischen Berechnungsmodells. In: *Proceedings des 12. Fachkolloquiums der WGTL, Stuttgart, 28.-29. September 2016*.
- Eder, M.; Kartnig, G.: Throughput analysis of S/R shuttle systems and ideal geometry for high performance. *FME Transaction* 44 (2016) 2, S. 174–179.
- European Materials Handling Federation FEM 9860: *Guideline Cycle time calculation for automated vehicle storage and retrieval systems*, August 2017.
- Kemme, N.: RMG Crane Scheduling and Stacking. In: Böse, J.W. (Hrsg.): *Handbook of Terminal Planning*. New York, NY: Springer New York 2011, S. 271–301.
- Lerher, T.; Ekren, Y.B.; Sari, Z.: Simulation Analysis of Shuttle Based Storage and Retrieval Systems. *International Journal of Simulation Modelling* (2015), S. 48–59.
- MacCarthy, B.L.; Liu, J.: Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling. *International Journal of Production Research* 31 (1993) 1, S. 59–79.
- Marchet, G.; Melacini, M.; Perotti, S.; Tappia, E.: Analytical model to estimate performances of autonomous vehicle storage and retrieval systems for product totes. *International Journal of Production Research* 50 (2012) 24, S. 7134–7148.
- Peterson, B.; Harjunoski, I.; Hoda, S.; Hooker, J.N.: Scheduling multiple factory cranes on a common track. *Computers & Operations Research* 48 (2014), S. 102–112.
- Trummer, W.; Jodin, D.: Welche Leistung haben Shuttles? Hebezeuge Fördermittel 54 (2014) 5, S. 240–242.
- Zhao, N.; Luo, L.; Lodewijks, G.: Scheduling two lifts on a common rail considering acceleration and deceleration in a shuttle based storage and retrieval system. *Computers & Industrial Engineering* 124 (2018), S. 48–57.
- Zhao, N.; Luo, L.; Zhang, S.; Lodewijks, G.: An efficient simulation model for rack design in multi-elevator shuttle-based storage and retrieval system. *Simulation Modelling Practice and Theory* 67 (2016), S. 100–116.