

J. Fottner · A. Habl

# **Optimale Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen**

# Forschungsbericht

zu dem IGF-Vorhaben

## ***Optimale Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen***

der Forschungsstelle

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Das IGF-Vorhaben 20002N der Forschungsvereinigung  
Bundesvereinigung Logistik e.V. - BVL wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen  
Gemeinschaftsforschung (IGF) vom

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

**fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Verfasser:

Andreas Habl, M. Sc.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Printed in Germany 2021

ISBN: 978-3-948514-09-9

**fml** – Lehrstuhl für

Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Tel.: + 49.89.289.15921

Fax: + 49.89.289.15922

[www.mw.tum.de/fml](http://www.mw.tum.de/fml)

## Kurzfassung

---

Die Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens ist die Steigerung des Durchsatzes von Shuttle-Systemen mit gassen- und ebenengebundenen Fahrzeugen durch den Einsatz mehrerer Shuttle-Fahrzeuge in derselben Ebene und mehrerer Lift-Fahrzeuge in demselben Schacht. In der Ebene und im Lift entstehen dadurch Bereiche, die von mehreren Fahrzeugen (Server) gemeinsam befahren und als Multi-Server-Systeme bezeichnet werden. Ein robuster und effizienter Betrieb des daraus hervorgehenden Multi-Server-Shuttle-Systems setzt allerdings hohe Anforderungen an die Steuerung. Außerdem macht die Vielzahl an unterschiedlichen Konfigurationen die Durchsatzbestimmung des Gesamtsystems zu einer Herausforderung.

Zu Beginn des Forschungsprojekts wurden mithilfe von Expertengesprächen und einer Literaturrecherche der Stand der Technik von Shuttle- und Multi-Server-Systemen erarbeitet. Auf dieser Basis wurden relevante Ausprägungen von Multi-Server-Shuttle-Systemen und deren Auswirkungen auf die Freiheitsgrade der Steuerung identifiziert. Für die ausgewählten Systemausprägungen wurden Betriebsstrategien für die Zuweisung der Aufträge an die Lift- und Shuttle-Fahrzeuge sowie Bewegungsstrategien für die Ausführung der Aufträge entwickelt. Anschließend wurde ein parametrierbares Simulationstool erstellt, in welches sich die Steuerungsstrategien einbinden sowie unterschiedliche Konfigurationen analysieren und bewerten lassen. Mithilfe des entwickelten Simulationsmodells wurden Parameterstudien durchgeführt und basierend auf den Simulationsergebnissen Handlungsempfehlungen zur durchsatzoptimalen Konfiguration der Systeme abgeleitet.

Multi-Server-Shuttle-Systeme stellen eine bisher wenig beachtete Variante von Shuttle-Systemen dar, die gegenüber herkömmlichen Lösungen eine erhöhte Durchsatzleistung erzielen kann. Dabei lässt sich insbesondere auch die Leistung von Bestandsanlagen erhöhen, indem diese durch Hinzufügen weiterer Lift- und Shuttle-Fahrzeuge und unter Anwendung der entwickelten Steuerungsstrategien in Multi-Server-Shuttle-Systeme überführt werden.

Das angestrebte Forschungsziel wurde erreicht.

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	2
1.2 Forschungsziel	4
1.3 Vorgehensweise und Lösungsweg	5
<b>2 Stand der Technik und Forschung</b>	<b>7</b>
2.1 Shuttle-Systeme	7
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise	7
2.1.2 Klassifizierung und Eingrenzung	8
2.1.3 Auslegung	9
2.1.4 Steuerung	12
2.2 Multi-Server-Systeme	13
2.2.1 Steuerung von Kranen	13
2.2.2 Steuerung von Aufzügen	14
2.2.3 Steuerung von Robotern	15
2.2.4 Steuerung von Regalbediengeräten	16
2.2.5 Steuerung von Zügen	16
2.3 Zwischenfazit und Forschungsbedarf	17
<b>3 Ausprägungen von Multi-Server-Shuttle-Systemen</b>	<b>19</b>
3.1 Dimensionierung	19
3.2 Konfiguration	20
3.2.1 Konfiguration der liftbezogenen Parameter	20
3.2.2 Konfiguration der ebenebezogenen Parameter	21
3.3 Freiheitsgrade der Steuerung	23
<b>4 Entwicklung von Steuerungsstrategien</b>	<b>27</b>
4.1 Vergabe von Aufträgen	27
4.1.1 Funktionsbeschränkte Vergabe	28
4.1.2 Ortsbeschränkte Vergabe	29
4.1.3 Unbeschränkte Vergabe	29

---

4.2	Zuordnung von Aufträgen	30
4.2.1	Sukzessive Zuordnung	30
4.2.2	Simultane Zuordnung	32
4.3	Ausführung von Aufträgen	33
4.3.1	Blockreservierung	33
4.3.2	Abstandsregelung	34
<b>5</b>	<b>Modellierung und Implementierung eines Simulationsmodells</b>	<b>35</b>
5.1	Modellierung der Systemkomponenten	35
5.1.1	Ebene	35
5.1.2	Lift	36
5.2	Modellierung der Fahrzeugdynamik	37
5.3	Modellierung der Lagerprozesse	38
5.3.1	Einlagerung	38
5.3.2	Auslagerung	38
5.3.3	Umlagerung	38
5.4	Implementierung des Simulationsmodells	39
5.4.1	Funktionsmodule	39
5.4.2	Systemkomponenten	41
5.4.3	Fahrzeugdynamik	42
5.4.4	Lagerprozesse	42
<b>6</b>	<b>Durchführung und Auswertung der Parameterstudien</b>	<b>45</b>
6.1	Definition der Ein- und Ausgabeparameter	45
6.2	Simulationsspezifische Untersuchungen	46
6.2.1	Untersuchung der Simulationszeit	46
6.2.2	Untersuchung der Ein- und Ausschwingphase	47
6.3	Überprüfung der Forschungshypothese	48
6.3.1	Untersuchung der Referenzkonfiguration	48
6.3.2	Versuchsplanung	52
6.3.3	Auswertung	55
6.4	Vergleich der Steuerungsstrategien	57
6.4.1	Vergleich der Vergabestrategien	58
6.4.2	Vergleich der Zuordnungsstrategien	64
6.4.3	Vergleich der Ausführungsstrategien	65
6.5	Ergebnisdiskussion	66

---

<b>7</b>	<b>Ableitung von Handlungsempfehlungen</b>	<b>69</b>
7.1	Vorgehensweise zur Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen	69
7.2	Untersuchung der Durchsatzänderung unter Variation der Dimensionen	70
7.3	Untersuchung der Leistungssteigerung unter Variation der Fahrzeuganzahl	73
7.4	Diskussion zur Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen	75
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick</b>	<b>77</b>
8.1	Zusammenfassung	77
8.2	Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	78
8.3	Förderhinweis	79
8.4	Ausblick	79
	<b>Verzeichnis der Veröffentlichungen</b>	<b>81</b>
	<b>Verzeichnis der studentischen Arbeiten</b>	<b>83</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>85</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>91</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>95</b>
	<b>Anhang A Leitfaden Experteninterview</b>	<b>A-1</b>

---

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V.
AKL	Automatisches Kleinteilelager
BVL	Bundesvereinigung Logistik e. V.
CSP	Crane Scheduling Problem
DCP	Double Cycle Priority
FCFS	First-Come-First-Served
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
I/O-Ebene	Input/Output-Ebene
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LAM	Lastaufnahmemittel
LE	Ladeeinheit
LIV	Longest Idle Vehicle
LUV	Least Utilized Vehicle
NJ	Nearest Job
NV	Nearest Vehicle
NVIP	Nearest Vehicle with Idle Priority
NVTM	Nearest Vehicle with Task Maximum
RJ	Random Job
RV	Random Vehicle
TA	Transportauftrag
TE	Transporteinheit



# 1 Einleitung

Shuttle-Systeme bilden eine flexible und leistungsfähige Möglichkeit zur automatisierten Lagerung von Transporteinheiten (TE). Dadurch haben sich diese Lagersysteme in relativ kurzer Zeit fest in der Intralogistik etabliert und beinahe jeder große Anbieter von Intralogistiksystemen führt inzwischen ein Shuttle-System im Portfolio [WEK-2017]. Der Einsatz von Shuttle-Systemen für kleine Ladeinheiten (LE) erfolgt bei der Lagerung und beim Transport – gegebenenfalls auch außerhalb des Lagerbereichs – von leichten Stückgütern wie Behältern, Schachteln oder Trays [VDI-2692]. Gegenüber automatisierten Lagersystemen mit Regalbediengeräten zeichnen sich Lagersysteme auf Shuttle-Basis unter anderem durch eine erhöhte Durchsatzleistung, eine flexiblere Anpassung an baulichen Randbedingungen und eine einfachere Skalierbarkeit aus [Cie-2015]. Shuttle-Systeme entsprechen damit dem Trend zu steigenden Anforderungen hinsichtlich der Dynamik automatisierter Lagersysteme [Dav-2015].

Im Zuge der Entwicklung von Shuttle-Systemen haben sich am Markt verschiedene Systemtypen herausgebildet. Die höchste Durchsatzleistung erbringen Shuttle-Systeme mit gassen- und ebenengebundenen Shuttle-Fahrzeugen für den Horizontaltransport in Verbindung mit Behälterliften zur Durchführung des Vertikaltransports. In diesen Systemen wird der maximal erzielbare Durchsatz durch die Leistungsfähigkeit der einzelnen Fahrzeuge begrenzt. Allerdings wird bisher meist nur jeweils ein Shuttle-Fahrzeug je Gasse und Ebene sowie ein Lift-Fahrzeug je Behälterlift eingesetzt. Um die Durchsatzleistung dieses Systemtyps innerhalb einer Gasse nachträglich zu steigern, kann jedoch die Fahrzeuganzahl in Ebene und Lift erhöht werden (Abbildung 1-1).

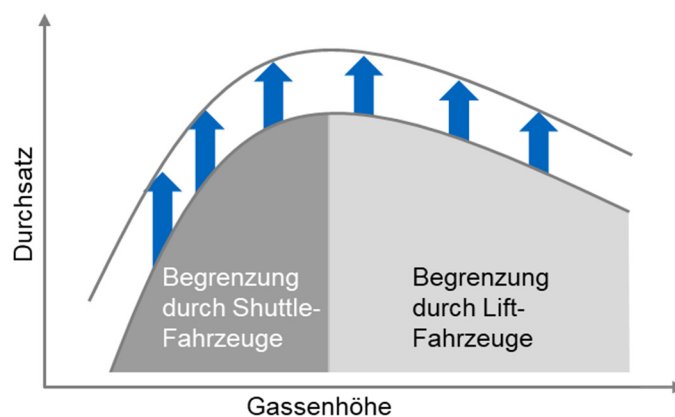


Abbildung 1-1: *Durchsatzbegrenzung und Steigerungspotential durch den Einsatz weiterer Lift- und Shuttle-Fahrzeuge*

Der Betrieb dieser neuen Systemvariante setzt jedoch hohe Anforderungen für eine robuste und effiziente Steuerung der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge. Zudem stellt die Konfiguration solcher Systeme im Rahmen der Auslegung eine Herausforderung dar.

## 1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Durch den Einsatz von mehreren Lift-Fahrzeugen im Liftschacht und mehreren Shuttle-Fahrzeugen in der Ebene einer Gasse entstehen Shuttle-Systeme, in denen mehrere Fahrzeuge (hier auch als Server bezeichnet) entlang einer gemeinsamen vertikalen bzw. horizontalen Linie verfahren. Innerhalb einer Gasse bilden daher Ebenen und Lifte jeweils Multi-Server-Systeme, die miteinander verknüpft sind und somit eine Verkettung von mehreren Multi-Server-Systemen darstellen (Abbildung 1-2).

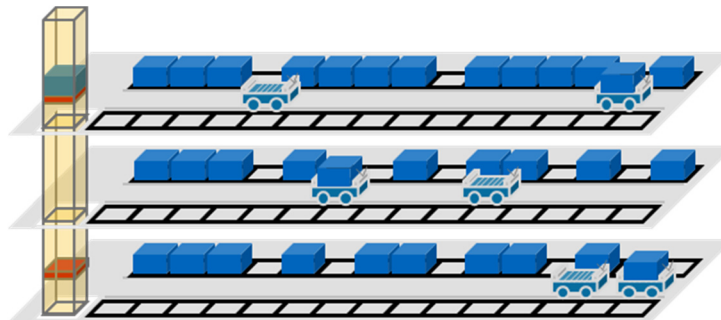


Abbildung 1-2: Verkettung von mehreren Multi-Server-Systemen in einer Gasse: Zwei Lift-Fahrzeuge im Liftschacht sowie jeweils zwei Shuttle-Fahrzeuge in den Ebenen

Das daraus resultierende Multi-Server-Shuttle-System erfordert erweiterte Steuerungsstrategien für einen robusten sowie effizienten Betrieb und bietet eine Vielzahl an unterschiedlichen Ausprägungen hinsichtlich der Systemkonfiguration und Dimensionierung.

Die Steuerungsstrategien gewährleisten die Durchführung der Transportaufträge (Ein-, Aus- und Umlagerungen) innerhalb einer Gasse. Da in Multi-Server-Shuttle-Systemen stets mehrere Server zur Auswahl stehen, ist die Auftragsvergabe an die Lift- und Shuttle-Fahrzeuge sowie die Reihenfolge der Auftragsbearbeitung zu koordinieren. Um Blockaden und Kollisionen in den gemeinsamen Bewegungsbereichen zu vermeiden, ist außerdem die Wegfindung der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge zu steuern.

Schließlich sind für einen reibungslosen Betrieb auch sämtliche allgemeinen Abläufe im Lift und in der Ebene sowie an deren Schnittstellen zu regeln. Dies umfasst insbesondere die Auftragsfreigabe für die Lift- und Shuttle-Fahrzeuge sowie die Belegung der Übergabepuffer.

Die Systemkonfiguration definiert den physischen Aufbau einer Lagergasse. Entsprechend der geforderten Durchsatzleistung einer Gasse ist beispielsweise die Anzahl und Position der Lifte innerhalb der Lagergasse zu bestimmen. In Multi-Server-Shuttle-Systemen ist insbesondere die Anzahl der Lift-Fahrzeuge je Liftschacht und die Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge je Ebene zu konfigurieren.

Die Dimensionierung beschreibt die räumliche Ausdehnung einer Lagergasse. Dies ist gemäß der benötigten Stellplatzanzahl in der Gasse anhand der Höhe (Anzahl der Ebenen), Länge (Anzahl der Lagerfächer in Längsrichtung) und Tiefe (Anzahl der Lagerfächer in Querrichtung) festzulegen.

Beeinflusst werden die Freiheitsgrade hinsichtlich der Steuerung, Systemkonfiguration und Dimensionierung durch lagerspezifische Randbedingungen. So sind beispielsweise die räumlichen Gegebenheiten, die Auftragsstruktur oder der Lagerfüllgrad beim Betrieb und bei der Auslegung des Lagers zu berücksichtigen.

Multi-Server-Shuttle-Systeme stellen eine neue Variante von Shuttle-Systemen dar, die noch höhere Durchsätze ermöglicht und die Angebotsvielfalt erhöht. Dabei lassen sich auch bestehende Shuttle-Systeme aufwandsarm an veränderte Dynamikanforderungen anpassen, indem weitere Lift- und Shuttle-Fahrzeuge hinzugefügt werden. Da die Planung für jeden Anwendungsfall individuell erfolgt, stellt dies für die Planer, die vorrangig im Bereich der kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) anzutreffen sind, eine neue Herausforderung dar. Um Folgekosten durch Über- und Unterdimensionierungen bzw. falsche Konfigurationen zu vermeiden, kann die Planung mithilfe der Simulation abgesichert werden. Die VDI-Richtlinie 3633 führt auf, dass durch den Einsatz von Simulation 20 % des Investitionsvolumens beeinflussbar ist und 2-4 % der beeinflussbaren Investitionskosten eingespart werden können [VDI-3633]. Daher kann durch die Anwendung von Simulation die Wettbewerbsfähigkeit von KMU gesteigert werden.

## 1.2 Forschungsziel

Im Forschungsvorhaben wird untersucht, ob sich Multi-Server-Shuttle-Systeme mit mehr als einem Fahrzeug pro Lift und Ebene mit einer geeigneten Layout- und Steuerungskonfiguration robust und effizient betreiben lassen und sich somit eine Steigerung der Durchsatzleistung gegenüber herkömmlichen Shuttle-Systemen erzielen lässt (Abbildung 1-3). Hierfür werden Betriebsstrategien entworfen und ein parametrierbares Simulationsmodell entwickelt, in welches die Strategien eingebunden werden können. Dies erlaubt eine anschließende Analyse und Bewertung unterschiedlicher Ausprägungen von Multi-Server-Shuttle-Systemen und ermöglicht die Ableitung von Handlungsempfehlungen für deren Konfiguration.

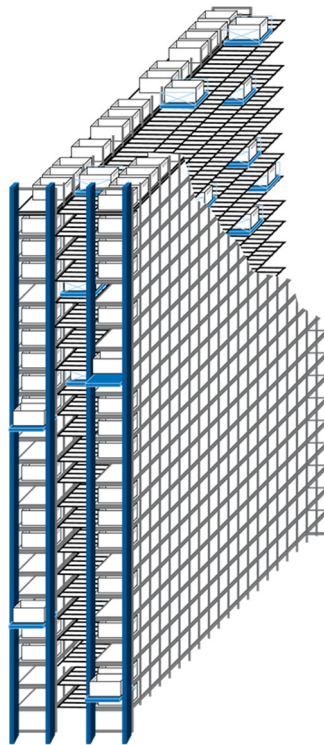


Abbildung 1-3: Schematische Darstellung einer Lagergasse eines Multi-Server-Shuttle-Systems

Ziel des Forschungsprojekts *Optimale Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen (OptiMUSS)* ist die Entwicklung von Strategien zur robusten und effizienten Steuerung von Multi-Server-Shuttle-Systemen sowie die Entwicklung eines simulationsbasierten Softwaretools zur Auslegung solcher Systeme. Die Leitfrage, die im Rahmen des Forschungsprojekts beantwortet werden soll, lautet daher:

**„Welche Steuerungsstrategien können angewandt werden, um Multi-Server-Shuttle-Systeme robust und effizient betreiben zu können und wie muss ein Simulationswerkzeug konzipiert sein, um die durchsatzoptimale Konfiguration zu ermitteln?“**

## 1.3 Vorgehensweise und Lösungsweg

Die Vorgehensweise zur Erreichung des Forschungsziels basiert auf den im Forschungsantrag definierten Arbeitspaketen (AP) des Forschungsprojekts. Abbildung 1-4 zeigt deren Zuordnung zu den Kapiteln des Forschungsberichts und die jeweiligen Ergebnisse.

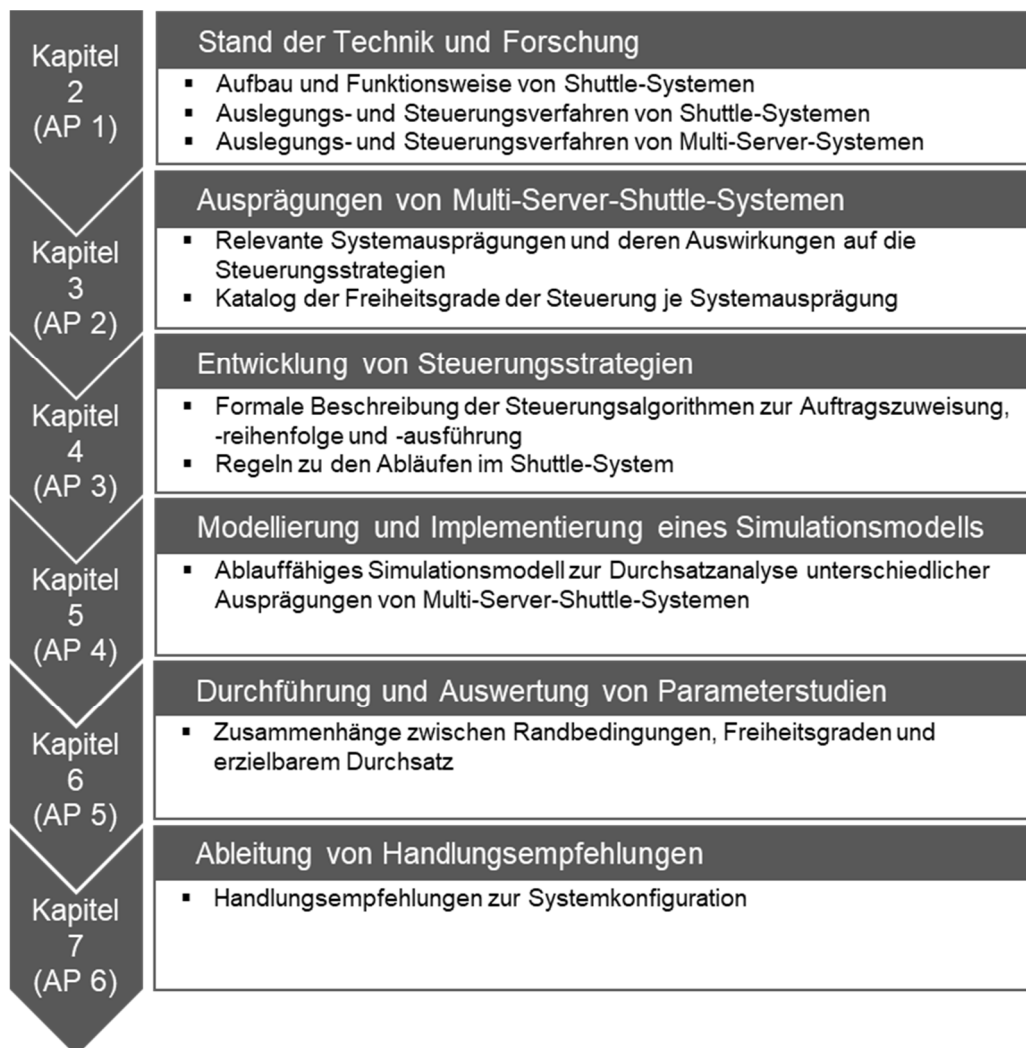


Abbildung 1-4: Beschreibung und Zuordnung der Arbeitspakete des Forschungsprojekts zu den Kapiteln des Forschungsberichts

In **Kapitel 2** werden die Ergebnisse des Arbeitspakets 1 (Stand der Technik von Shuttle- und Multi-Server-Systemen) beschrieben. Darin werden zunächst der Aufbau und die Funktionsweise von Shuttle-Systemen dargestellt. Außerdem werden auf Basis der durchgeführten Experteninterviews und strukturierten Literaturrecherche die Auslegungs- und Steuerungsverfahren von Shuttle- sowie Multi-Server-Systemen in Wissenschaft und Praxis erläutert.

**Kapitel 3** beschreibt die Ergebnisse von Arbeitspaket 2 (Identifikation von Systemausprägungen und deren Auswirkungen auf die zu entwickelnden Steuerungsstrategien). Hierzu werden die mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses zusammengetragenen Ausprägungen von Multi-Server-Shuttle-Systemen aufgeführt und deren Auswirkungen auf die Steuerung analysiert.

Die zentralen Ergebnisse von Arbeitspaket 3 (Entwicklung von Steuerungsstrategien) werden in **Kapitel 4** präsentiert. Dies umfasst insbesondere die formalen Beschreibungen der entwickelten Strategien zur Auftragszuweisung, -reihenfolge und -ausführung. Zudem werden relevante Regeln für den allgemeinen Betrieb von Multi-Server-Shuttle-Systemen erläutert.

Das Arbeitspaket 4 (Modellierung und Implementierung eines Simulationsmodells) wird in **Kapitel 5** erläutert. Hierbei werden die Modellierung der Komponenten und Prozesse in Multi-Server-Shuttle-Systemen sowie die Implementierung in der Simulationsumgebung beschrieben.

Die in Arbeitspaket 5 (Parameterstudien zur Untersuchung der Forschungshypothese) durchgeführten Simulationsstudien werden in **Kapitel 6** präsentiert. Darin werden die Zusammenhänge zwischen Randbedingungen, Freiheitsgraden und erzielbarem Durchsatz anhand von Kennlinien dargestellt.

**Kapitel 7** beschreibt die in Arbeitspaket 6 (Ableiten von Handlungsempfehlungen) erzielten Ergebnisse. Auf Basis einer Regressionsanalyse werden Empfehlungen für die Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen formuliert.

Abschließend werden in **Kapitel 8** die erzielten Forschungsergebnisse zusammengefasst und zukünftiger Forschungsbedarf aufgezeigt.

## 2 Stand der Technik und Forschung

---

Dieses Kapitel beinhaltet den Stand der Technik und Forschung der im Forschungsvorhaben betrachteten Shuttle- und Multi-Server-Systeme und legt die Basis für die optimale Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen. Die Erkenntnisse basieren auf Fachliteratur und Expertengesprächen. Der hierbei verwendete Leitfaden ist in Anhang A dargestellt. Abschließend folgt ein Fazit zum Forschungsbedarf in der Auslegung und Steuerung von Multi-Server-Shuttle-Systemen.

### 2.1 Shuttle-Systeme

Shuttle-Systeme werden in verschiedensten Branchen eingesetzt, in denen palettierte Waren, aber auch kleine LE wie Behälter, Schachteln oder Tablare gelagert werden [Hom-2018]. Zunächst werden der Aufbau und die Funktionsweise dieses Lagersystems beschrieben. Es folgt eine Klassifizierung der auf dem Markt befindlichen Shuttle-Systeme mit anschließender Eingrenzung auf die betrachtete Systemvariante. Schließlich werden die Verfahren aus der Praxis und Ansätze aus der Forschung im Bereich der Auslegung und Steuerung von Shuttle-Systemen vorgestellt.

#### 2.1.1 Aufbau und Funktionsweise

Die VDI-Richtlinie 2692 beschreibt strukturiert die Systemtechnologie von Shuttle-Systemen für kleine LE und stellt die weitgehende Trennung von Horizontal- und Vertikaltransport als wesentliches Merkmal dieser Technologie heraus. So verfahren üblicherweise die Shuttle-Fahrzeuge im Regal auf der jeweiligen Fahrschiene horizontal in Gassenlängsrichtung ( $x$ -Achse), wohingegen sich die Lift-Fahrzeuge im jeweiligen Liftschacht in vertikaler Richtung bewegen ( $y$ -Achse). Das Lastaufnahmemittel (LAM) der Shuttle-Fahrzeuge greift in Gangquerrichtung ( $z$ -Achse) auf die LE zu. So transportiert bei einer Einlagerung der Lift die LE von der Einlagerebene in die entsprechende Lagerebene und übergibt dort an das Shuttle-Fahrzeug, welches die LE bis zum Lagerort transportiert und abgibt. Bei einer Auslagerung wird die LE durch das Shuttle-Fahrzeug am Lagerort aufgenommen und zum Übergabepplatz des Lifts transportiert, von welchem das Lift-Fahrzeug wiederum die LE zur Auslagerebene bewegt [VDI-2692].

Der Aufbau einer Lagergasse mit gassen- und ebenengebundenen Shuttle-Fahrzeugen und Lift-Fahrzeugen sowie deren Bewegungsrichtungen ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Die Behälterlifte mit je einem Lift-Fahrzeug sind an der Stirnseite der Gasse angeordnet. Auf den Ebenen verfährt jeweils ein Shuttle-Fahrzeug.

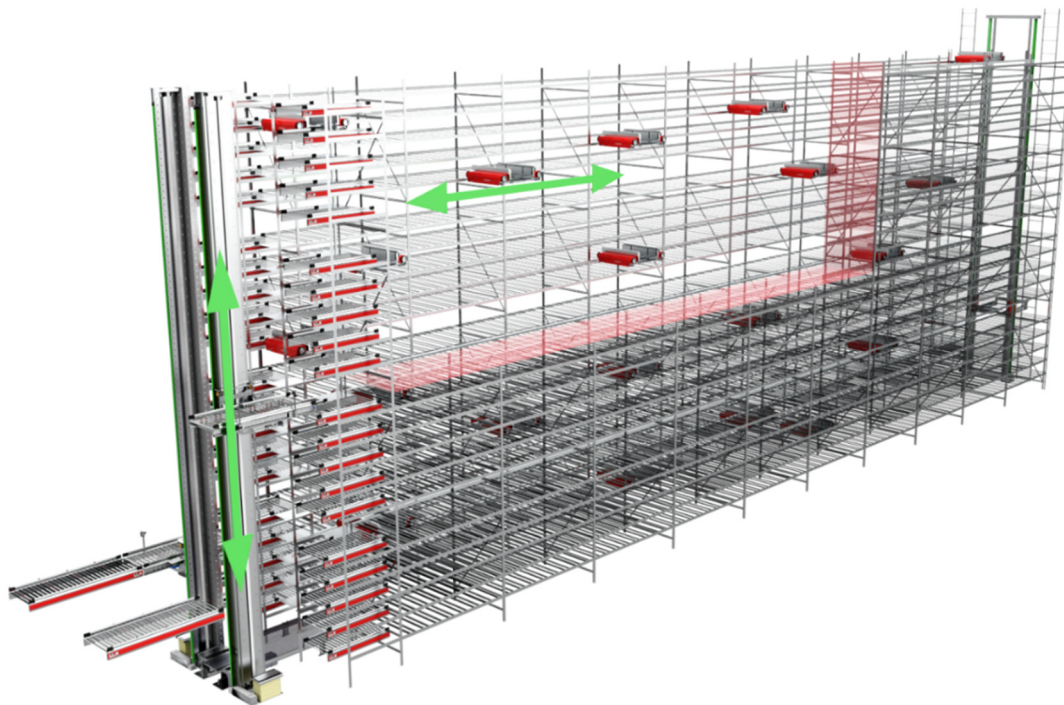


Abbildung 2-1: Lagergasse eines Shuttle-Systems mit gassen- und ebenengebundenen Shuttle-Fahrzeugen und Behälterliften (Quelle: TGW Logistics Group GmbH)

### 2.1.2 Klassifizierung und Eingrenzung

Shuttle-Systeme werden grundsätzlich nach der Art des Transports in vertikaler Richtung unterteilt. Sofern der Vertikaltransport durch Behälterlifte erfolgt, bewegen sich die Shuttle-Fahrzeuge ausschließlich in einer Ebene der Lagergasse. Somit ist auf jeder Ebene jeweils ein Shuttle-Fahrzeug notwendig. Ein Behälterlift besteht aus einem vertikalen Liftschacht, in welchem sich ein Lift-Fahrzeug bewegen kann. Shuttle- und Lift-Fahrzeuge übergeben die transportierten LE mithilfe von Übergabefächern, welche die Schnittstelle zwischen Lift und Ebene bilden. Bei Systemen mit Fahrzeugliften hingegen sind die Shuttle-Fahrzeuge in der Lage, die Ebene über den Lift zu wechseln. LE können somit durch das Shuttle-Fahrzeug auch in vertikaler Richtung transportiert werden. Dies ermöglicht eine geringere Anzahl benötigter Shuttle-Fahrzeuge gegenüber Systemen mit Behälterliften, da nicht jede Ebene mit einem Shuttle-Fahrzeug ausgestattet werden muss. Beide Grundformen von Shuttle-Systemen können so ausgeführt sein, dass die Shuttle-Fahrzeuge über schwenkbare Transporträder bzw. ein zusätzliches Seifahrwerk auch in der Lage sind, die Gasse zu wechseln [VDI-2692].

Damit ergeben sich verschiedene Bewegungsachsen der Shuttle-Fahrzeuge, auf deren Basis Shuttle-Systeme klassifiziert werden können. Abbildung 2-2 zeigt die vier Varianten von Shuttle-Systemen, die durch Kombination der Freiheitsgrade entstehen.



In den Varianten 2 bis 4 ist ein Ebenen- oder Gassenwechsel durch die Shuttle-Fahrzeuge möglich. Dies bewirkt jedoch eine Minderung der Durchsatzleistung, da sich bei einem Ebenenwechsel Wartezeiten auf den Fahrzeughift oder bei einem Gassenwechsel längere Fahrtzeiten ergeben.

In Variante 1 hingegen sind Horizontal- und Vertikaltransport vollständig entkoppelt. Demnach können in dieser Variante die höchsten Durchsätze erzielt werden. Nachdem im Forschungsprojekt OptiMUSS Shuttle-Systeme im Hochleistungsbereich untersucht werden, beschränkt sich die Betrachtung auf Systemausprägungen der Variante 1. Folglich bilden Shuttle-Systeme mit Behälterliften sowie gassen- und ebenengebundenen Shuttle-Fahrzeugen den Gegenstand der wissenschaftlichen Untersuchung.

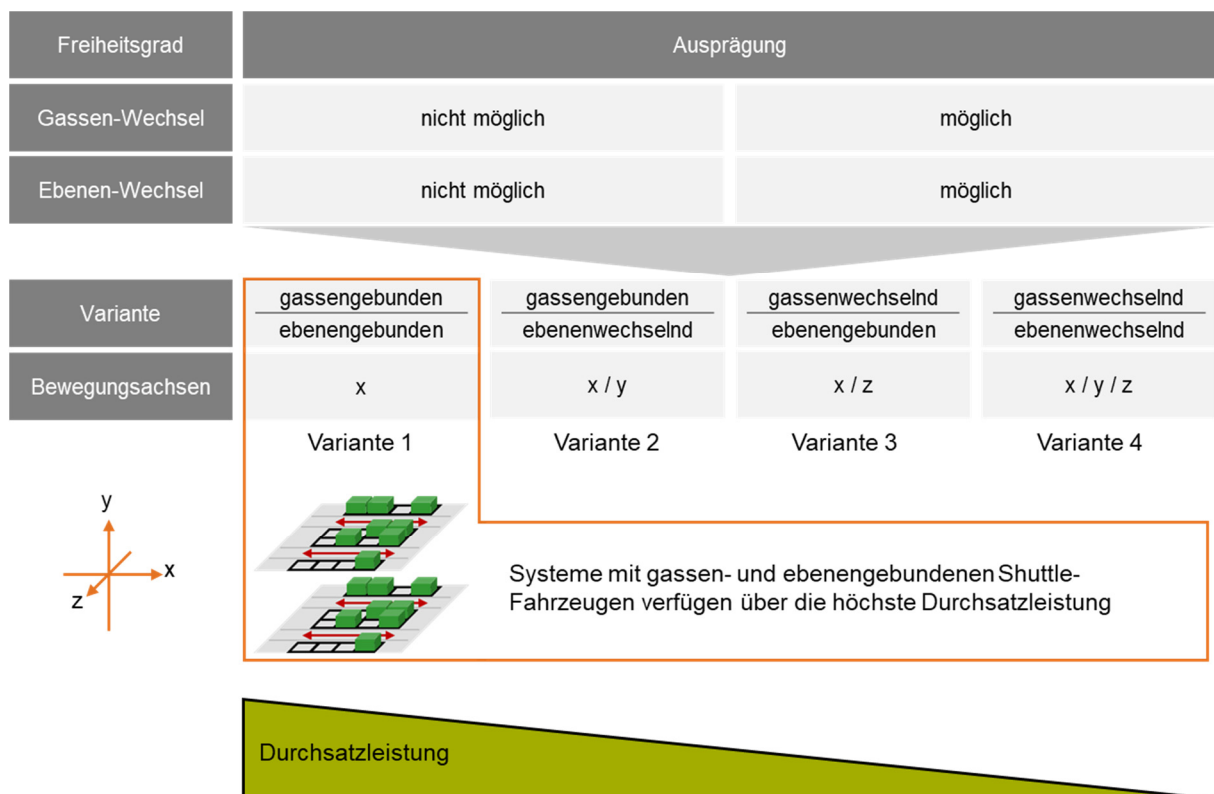


Abbildung 2-2: Klassifizierung der Shuttle-Systeme nach den Bewegungsachsen der Shuttle-Fahrzeuge nach [Hab-2018]

### 2.1.3 Auslegung

Gegenüber den herkömmlichen automatischen Kleinteilelagern (AKL) bieten Shuttle-Lagersysteme eine höhere Durchsatzleistung und Verfügbarkeit, ermöglichen einen höheren Raumnutzungsgrad und sind je nach Ausprägung leichter skalierbar [Geo-2012].

Allerdings erfordern Shuttle-Systeme höhere Investitionen im siebenstelligen Bereich, sodass eine sorgfältige Planung unabdingbar ist, um Folgekosten durch eine falsche Systemauswahl zu vermeiden. So gilt es im Rahmen der Auslegung von Shuttle-Systemen zunächst, sämtliche Anforderungen zu spezifizieren. Dabei sind folgende technische Randbedingungen einzubeziehen:

- Verfügbarer Raum
- Brandschutzbeschränkungen
- Umgebungsbedingungen
- Erweiterungsflexibilität
- Statik des Regals
- Beschaffenheit der LE
- Shuttle-Typ
- Technische Möglichkeiten des Herstellers
- Patentschutz durch andere Hersteller

Außerdem sind für eine anforderungsgerechte Planung die folgenden systemischen Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Leistungsanforderung
- Durchlaufzeit
- Lagerfüllgrad
- Anzahl der Lagerplätze
- Verfügbarkeit
- Sequenzierung
- Belegungsstrategie
- Nachschubprozess

Nach Anforderungsdefinition erfolgt auf Basis von Erfahrungen aus bisherigen Planungen und Expertenwissen eine Abschätzung des Shuttle-Systems. Im nächsten Schritt wird mithilfe der FEM-Richtlinie 9.860 zur Spielzeitberechnung von Shuttle-Systemen [FEM-9860] und den entsprechenden Komponentenspezifikationen eine analytische Leistungsberechnung durchgeführt und sich iterativ dem Zielsystem angenähert. Abschließend findet je nach Anwendung teilweise oder vollumfänglich eine simulationsbasierte Absicherung anhand der ereignisorientierten Simulation statt. Zusammenfassend gliedert sich das in der Praxis angewandte Auslegungsverfahren von Shuttle-Systemen in mehrere Stufen und ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

Für die anforderungsgerechte Auslegung von Shuttle-Systemen ist insbesondere die erzielbare Durchsatzleistung zu bestimmen. Analytische Berechnungsmethoden erlauben eine schnelle Anwendung auf das auszulegende System, sind aber aufgrund von restriktiven bzw. vereinfachenden Annahmen nicht bei allen Shuttle-Systemen einsetzbar. Eine simulationsbasierte Durchsatzermittlung hingegen erfordert einen höheren Umsetzungs- und Zeitaufwand, erlaubt jedoch aufgrund des hohen Detaillierungsgrades die Abbildung sämtlicher Systemkonfigurationen und Betriebsstrategien [Gün-2008].

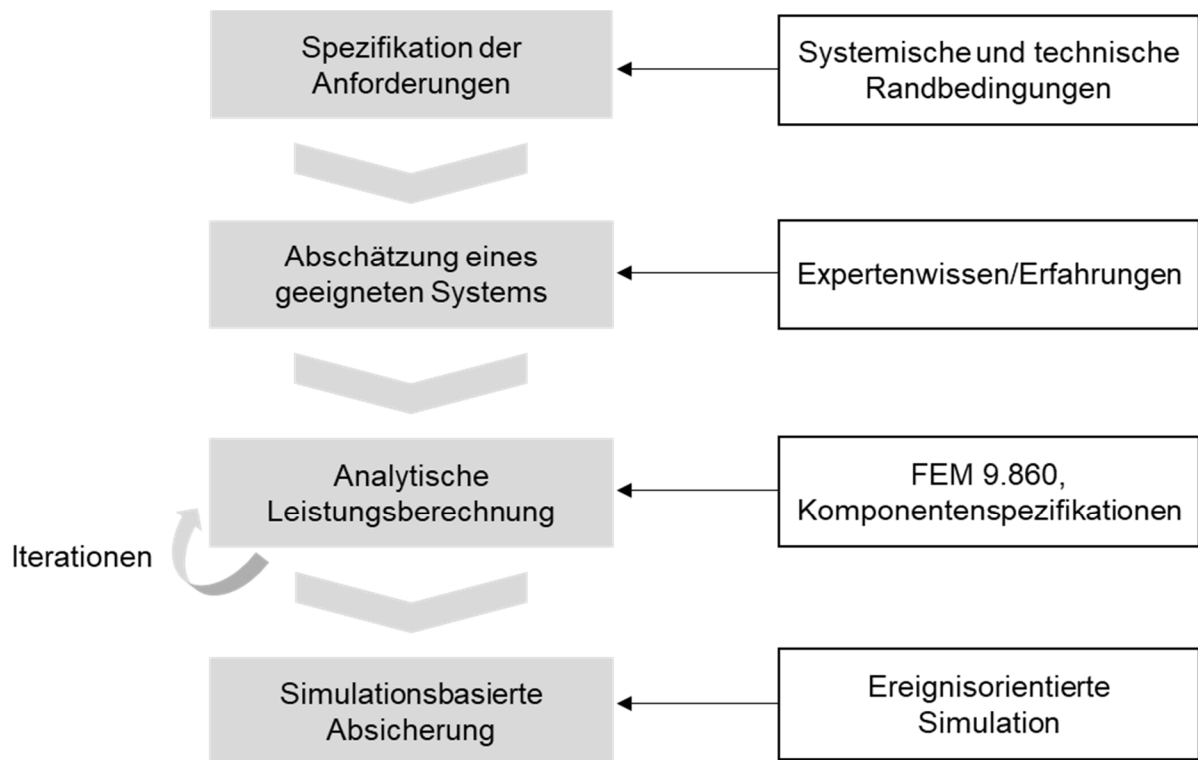


Abbildung 2-3: Auslegungsverfahren von Shuttle-Systemen in der Praxis

In der Literatur existieren Ansätze für beide Arten der Durchsatzberechnung. So enthält die VDI-Richtlinie 2692 ein analytisches Modell zur Durchsatzermittlung auf Basis der mittleren Spielzeiten von Lift- und Shuttle-Fahrzeug. Die Leistungsberechnung erfolgt bei Shuttle-Systemen mit zwei stirnseitig angeordneten Behälterliften im Einzelbetrieb oder einem Fahrzeuglift je Gasse, einfachtiefer Lagerung sowie gleicher Anfahrwahrscheinlichkeit aller Lagerplätze [VDI-2692]. Dieses Modell zur Durchsatzberechnung wird in der FEM-Richtlinie 9.860 erweitert und um zusätzliche Systemkonfigurationen, wie beispielsweise mehrfachtiefer Lagerung und mehreren Liften innerhalb der Regalgasse, ergänzt [FEM-9860]. *Marchet et al.* stellen ebenfalls ein analytisches Modell vor, welches die Durchsatzberechnung von Shuttle-Systemen mit gassen- und ebenengebundenen Shuttle-Fahrzeugen und einem Behälterlift je Gasse erlaubt [Mar-2012].

Das von *Eder und Kartnig* entwickelte analytische Modell betrachtet Shuttle-Systeme mit gassen- und ebenengebundenen Shuttle-Fahrzeugen, bei denen je Gasse zwei Behälterlifte die Ein- und Auslagerungen durchführen. Die Lagerebenen werden als Warteschlangensysteme modelliert und mithilfe von ereignisdiskreter Simulation validiert. [Ede-2015]

*Malmborg* entwickelt hingegen ein analytisches Modell für die Durchsatzberechnung von Shuttle-Systemen mit gassen- und ebenenwechselnden Shuttle-Fahrzeugen und

einem Fahrzeughift in jeder Gasse [Mal-2002]. Zudem existieren für Shuttle-Systeme mit Fahrzeughiften analytische Modelle zur effizienten Spielzeitberechnung [Kuo-2007] und zur Berechnung der Zykluszeit unter Berücksichtigung günstiger Kombinationen von Fahraufträgen der Fahrzeughifte [Fuk-2008].

Neben den analytischen Ansätzen existieren auch simulationsbasierte Modelle zur Durchsatzbestimmung von Shuttle-Systemen. So erweitern *Marchet et. al* ihren Ansatz aus [Mar-2012] um ein simulationsbasiertes Konzept zur Auslegung von Shuttle-Systemen unter Berücksichtigung der kinematischen Wechselwirkungen zwischen Liften und Shuttle-Fahrzeugen [Mar-2013].

*Lerher et al.* führen eine Simulationsstudie durch, um Auswirkungen von verschiedenen Einflussgrößen auf den Durchsatz von Shuttle-Systemen mit Behälterliften zu analysieren. Dabei beinhaltet jede Gasse zwei Lifte, die stirnseitig angeordnet sind und unabhängig voneinander arbeiten. [Ler-2015]

*Ning et al.* entwickeln ein Simulationsmodell zur Untersuchung von unterschiedlichen Konfigurationen mit mehreren Behälterliften je Gasse [Nin-2016]. *Ekren und Heragu* stellen ein Experimentdesign vor, mit dem sich mittels Simulation Einflussfaktoren auf den Durchsatz bestimmen lassen [Ekr-2010a]. Sie führen zudem eine simulationsbasierte Regressionsanalyse durch, um die durchsatzoptimale Dimension eines Shuttle-Systems mit Fahrzeughiften zu ermitteln [Ekr-2010b]. Außerdem präsentieren *Trummer und Jodin* ein Berechnungstool zur Durchsatzbestimmung von Shuttle-Systemen mit Behälter- und Fahrzeughiften mittels der Monte-Carlo-Simulation [Tru-2014].

#### **2.1.4 Steuerung**

Die Steuerung von Shuttle-Systemen ist hierarchisch strukturiert und in Abbildung 2-4 dargestellt. Während das übergreifende Lagerverwaltungssystem die Transportaufträge (TA) verwaltet, werden diese durch den Materialflussrechner auf die Gassen verteilt. Die jeweilige Gassensteuerung weist die Aufträge in der definierten Reihenfolge den Fahrzeugen zu, welche schließlich die Ausführung übernehmen. Dabei wirkt sich die Effizienz der Steuerung maßgeblich auf die erzielbare Durchsatzleistung von Shuttle-Systemen aus. Einfach aufgebaute Shuttle-Systeme, wie beispielsweise in [Mal-2002] und [Mar-2012], können mithilfe von Prioritätsregeln wie First-Come-First-Served (FCFS) gesteuert werden. Insbesondere bei vorgegebener Auslagersequenz von LE reichen einfache Prioritätsregeln jedoch nicht mehr aus. *Lienert und Günthner* präsentieren einen zeitenfensterbasierten Ansatz zur Steuerung von Shuttle-Systemen mit gassen- und ebenenwechselnden Shuttle-Fahrzeugen bei mehreren parallel zu bearbeitenden Sequenzströmen [Lie-2016].

*Carlo und Vis* betrachten ein Shuttle-System, in dessen Behälterliften jeweils zwei Lift-Fahrzeuge verfahren. Die Steuerung erfolgt dabei über eine Blocksequenzierung, die mittels einer Heuristik die Auftragsreihenfolge optimiert. [Car-2012]

Zhao et al. greifen den Ansatz von [Car-2012] auf und erweitern diesen durch die Berücksichtigung von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen der Fahrzeuge [Zha-2018].

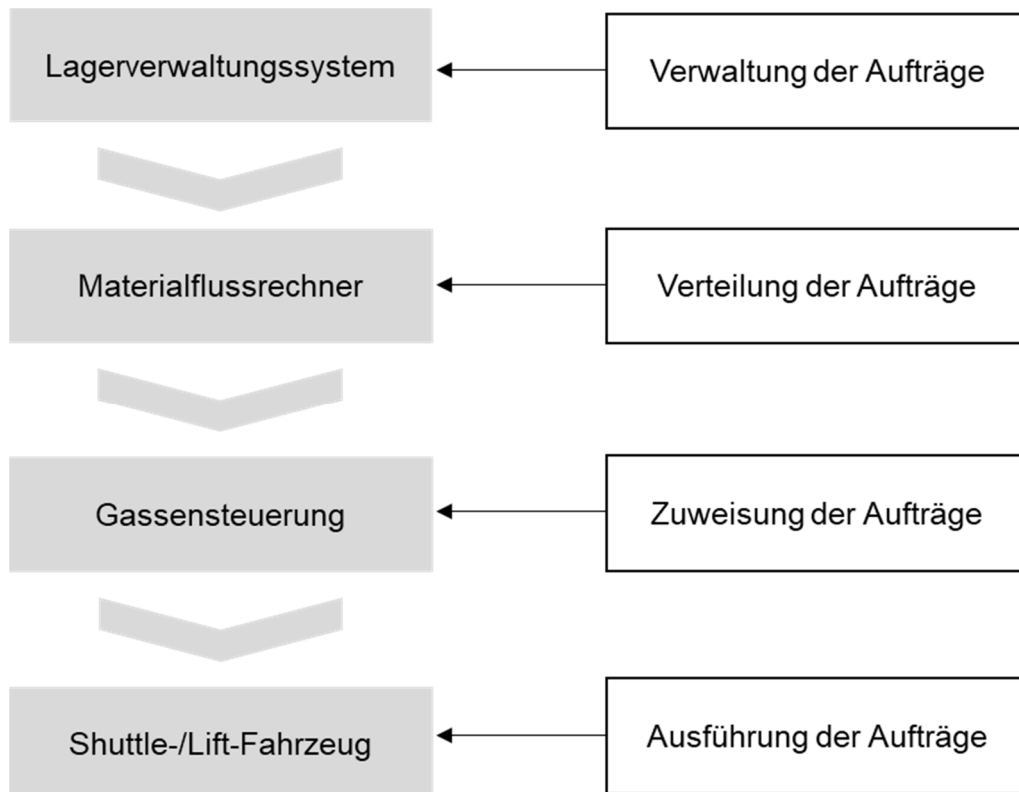


Abbildung 2-4: Steuerungsverfahren von Shuttle-Systemen in der Praxis

## 2.2 Multi-Server-Systeme

Im Forschungsprojekt OptiMUSS werden Multi-Server-Systeme durch Systeme charakterisiert, in denen mehrere Akteure im gleichen Bewegungsraum – entlang einer vertikalen oder horizontalen Linie – verfahren. Neben den im Forschungsprojekt betrachteten Multi-Server-Shuttle-Systemen finden sich in der Literatur zahlreiche weitere Anwendungen von Multi-Server-Systemen, die nachfolgend beschrieben werden.

### 2.2.1 Steuerung von Kranen

Während Portalkrane für die Be- und Entladung von Containerschiffen eingesetzt werden, finden sich Brückenkranen in Industriegebäuden für innerbetriebliche Transporte.

Durch den Einsatz von mehr als einem Portal- oder Brückenkran je Schiene können beide Anwendungen als Multi-Server-System ausgeführt sein (Abbildung 2-5). Zur Steuerung dieser Systeme existieren in der Fachliteratur zahlreiche Lösungsansätze, die sich im Rahmen des Crane Scheduling Problem (CSP) mit einer effizienten Auftragsplanung beschäftigen. Darin wird bestimmt, welcher Kran zu welcher Zeit einen TA ausführt [Kem-2011]. Das CSP ist np-schwer<sup>1</sup> und lässt sich somit nicht sicher in Polynomialzeit lösen [Lim-2004].

*Stahlbock und Voß* untersuchen verschiedene Heuristiken zur Auftragsplanung einer Portalkrananlage [Sta-2010]. *Ge et al.* stellen eine Blocksequenzierung auf Basis einer k-Opt-Heuristik zur Auftragsplanung bei Brückenkränen vor [Ge-2012]. Ebenso entwickeln *Peterson et al.* eine Blocksequenzierung, die mithilfe eines Lösungsbaumes den optimalen Ablaufplan identifiziert [Pet-2014].

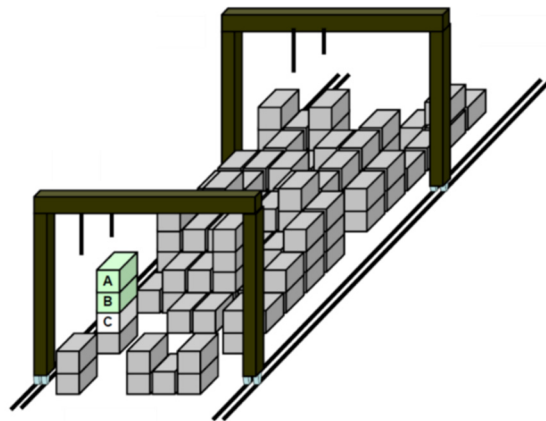


Abbildung 2-5: Zwei Portalkrane auf derselben Führungsschiene nach [Del-2009]

### 2.2.2 Steuerung von Aufzügen

Zur Leistungssteigerung in Personenaufzügen können mehrere Kabinen je Schacht eingesetzt werden (Abbildung 2-6). *Takahashi et al.* untersuchen Aufzüge mit jeweils zwei Kabinen in einem Schacht. Die Steuerung erfolgt auf Basis einer Zonierung des Schachts und wird mithilfe eines genetischen Algorithmus optimiert [Tak-2003]. Zur Steigerung der Effizienz präsentieren *Ishihara und Kato* einen Ansatz der dynamischen Zonierung [Ish-2013].

---

<sup>1</sup> Eigenschaft eines algorithmischen Problems

Darüber hinaus entwickeln *Valdivielso und Miyamoto* einen Algorithmus zur Auftragsvergabe, der ohne Zonierung auskommt [Val-2011]. *Tanaka und Watanabe* stellen außerdem einen Ansatz auf Basis von zeitbasierten Reservierungen zur Steuerung von mehreren Kabinen je Schacht vor [Tan-2009].

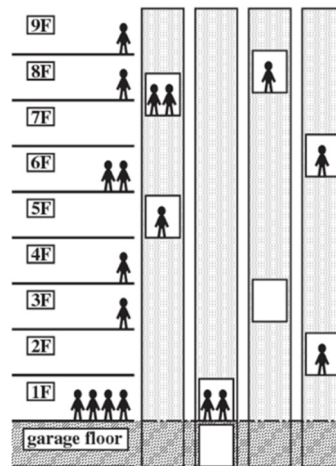


Abbildung 2-6: Mehrere Aufzugskabinen je Schacht nach [Tan-2009]

### 2.2.3 Steuerung von Robotern

In der Robotik kommen ebenso Multi-Server-Systeme zum Einsatz. So werden in [Erd-2014] zwei Roboter betrachtet, welche entlang einer gemeinsamen Führungsschiene verfahren (Abbildung 2-7). Daraufhin wird das Twin Robots Scheduling Problem eingeführt und es werden Lösungsansätze auf Basis von Heuristiken sowie exakten Verfahren präsentiert.



Abbildung 2-7: Zwei Roboter auf einer gemeinsamen Führungsschiene [Erd-2014]

## 2.2.4 Steuerung von Regalbediengeräten

In einem AKL untersuchen *Kung et al.* den Einsatz von mehreren Regalbediengeräten auf einer gemeinsamen Fahrschiene (Abbildung 2-8). Zur Steuerung werden die Aufträge in Cluster aufgeteilt, deren Auftragsreihenfolge anschließend optimiert wird. Zur Lösungsfindung wird ein Ansatz mit dynamischer Programmierung verwendet. [Kun-2014]

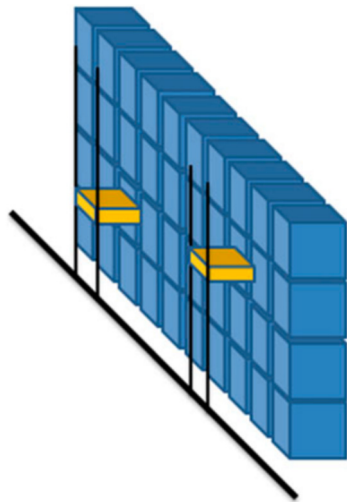


Abbildung 2-8: Zwei Regalbediengeräte auf einer gemeinsamen Schiene [Kun-2014]

## 2.2.5 Steuerung von Zügen

Im Bahnverkehr verfahren mehrere Züge auf derselben Schiene, sodass hier insbesondere die Vermeidung von Kollisionen fokussiert wird. Zur Sicherung der Gleise bzw. zur Kollisionsvermeidung kommt eine Reservierungsstrategie zum Einsatz. Hierbei wird die Bahnstrecke in Abschnitte (Blöcke) unterteilt, die zu jedem Zeitpunkt von nur einem Zug befahren werden dürfen (Abbildung 2-9). Damit ein Zug bzw. Fahrzeug einen Streckenabschnitt befahren darf, muss dieser frei sein und bis zur Einfahrt in den Block müssen die Fahrten von den anderen Fahrzeugen in diesen Streckenabschnitt verhindert werden. [Mas-2018]

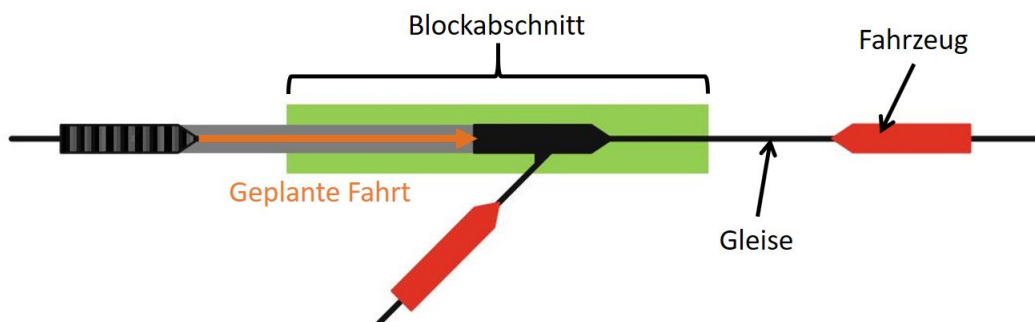


Abbildung 2-9: Blocksicherung im Bahnverkehr nach [Mas-2018]



## 2.3 Zwischenfazit und Forschungsbedarf

In der Literatur existieren zahlreiche Quellen zur Auslegung bzw. Durchsatzbestimmung von Shuttle-Systemen. Während analytische Modelle meist bei einfach aufgebauten Konfigurationen angewandt werden, finden sich simulationsbasierte Modelle dort, wo eine Vielzahl an Dimensionierungen und Konfigurationen untersucht werden. Insbesondere bei einfach konfigurierten Systemen werden die Lagerprozesse, wie beispielsweise die Auftragsvergabe, durch Prioritätsregeln gesteuert. Komplexere Steuerungen werden bisher nur von zwei Quellen bei Behälterliften mit je zwei Lift-Fahrzeugen untersucht. Die Durchsatzberechnung und Steuerung von Multi-Server-Systemen in der Ebene oder im Lift mit mehr als zwei Lift-Fahrzeugen wird in den Veröffentlichungen jedoch nicht behandelt. Außerdem erfolgt bislang keine Betrachtung von Multi-Server-Systemen in Lift und Ebene, die miteinander verknüpft sind.

Außerhalb der Shuttle-Systeme finden sich Multi-Server-Systeme in verschiedensten weiteren Anwendungen und sind Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. So finden sich Systeme mit mehr als einem Fahrzeug je Schiene auch bei Kranen, Aufzügen, Robotern, Regalbediengeräten und Zügen. Neben einfacheren Strategien zur robusten Ausführung, wie die Zonierung oder Reservierung von Abschnitten, werden auch leistungsfähigere Steuerungsalgorithmen zur effizienten Auftragsvergabe mithilfe von Optimierungsverfahren untersucht. Durch die fehlende Verkettung von mehreren Multi-Server-Systemen lassen sich deren Ansätze jedoch nicht ohne Weiteres auf Multi-Server-Shuttle-Systeme übertragen.



### 3 Ausprägungen von Multi-Server-Shuttle-Systemen

---

In diesem Kapitel werden die Freiheitsgrade hinsichtlich der Dimensionierung und Systemkonfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen beschrieben und die für das Forschungsprojekt relevanten Systemausprägungen identifiziert. Dies basiert auf Gesprächen mit Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses sowie auf Fachliteratur. Anschließend werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Ausprägungen auf die Steuerung untersucht.

#### 3.1 Dimensionierung

Die Dimensionierung beinhaltet alle Freiheitsgrade, welche die räumliche Ausdehnung des Lagers in den drei Dimensionen beschreiben. Dementsprechend werden die Anzahl und Länge der Lagergassen sowie die Anzahl der Lagerebenen festgelegt [Gün-2011]. Die Parameter zur Dimensionierung von Multi-Server-Shuttle-Systemen und ihre möglichen Ausprägungen sind nachfolgend in einem morphologischen Kasten dargestellt (Tabelle 3-1). Die Obergrenzen dieser Parameter unterliegen technischen Randbedingungen wie der verfügbaren Raumhöhe oder -breite. Die jeweilige Ausprägung der Parameter wird insbesondere durch die geforderte Anzahl an Stellplätzen beeinflusst. So wird durch die Gassenlänge und Anzahl der Ebenen bzw. Gassenhöhe die Anzahl der Lagerfächer in horizontaler und vertikaler Richtung festgelegt. Je nach Gassenanzahl wird die Anzahl der Lagerfächer entsprechend erweitert.

Tabelle 3-1: Morphologischer Kasten der Dimensionierung von Multi-Server-Shuttle-Systemen

Parameter	Ausprägungen
Anzahl der Gassen	1...N
Länge der Gassen	1...N
Anzahl der Ebenen	1...N

Im Forschungsprojekt OptiMUSS liegt der Fokus auf der Steuerung der gasseninternen Prozesse, weshalb sich die Untersuchung auf eine Gasse beschränkt. Weitere Gassen werden äquivalent gesteuert und können über eine gemeinsame Lagervorzone angeschlossen werden. Es werden Gassenlängen zwischen 50 m und 150 m sowie Gassenhöhen von 10 Ebenen bis 50 Ebenen betrachtet.

## 3.2 Konfiguration

Die Freiheitsgrade der Konfiguration definieren den physischen Aufbau des Lagers und sind je nach Leistungs- und Lagerkapazitätsanforderung verschieden ausgestaltet. Hierzu wird zwischen lift- und ebenenbezogenen Parametern einer Gasse unterschieden, deren mögliche sowie relevante Ausprägungen im Folgenden dargelegt werden.

### 3.2.1 Konfiguration der liftbezogenen Parameter

Die liftbezogenen Parameter beschreiben die Ausprägung eines Multi-Server-Shuttle-Systems hinsichtlich der Komponenten in einer Gasse, welche für den Vertikaltransport notwendig sind. Ihre möglichen Ausprägungen sind nachfolgend in einem morphologischen Kasten abgebildet (Tabelle 3-2).

Die jeweilige Ausprägung der einzelnen Parameter hängt vor allem von der geforderten Durchsatzleistung ab. So wird über die Anzahl und Position der Lifte die Ausgestaltung des Vertikaltransports von LE auf die Ebenen beschrieben. Die Lifte können paarweise oder einzeln am Gassenanfang oder -ende sowie innerhalb der Gasse (in x-Richtung) angebracht sein.

Die Anzahl der I/O-Ebenen je Lift definiert die Möglichkeiten für die Aufnahme und Abgabe von LE durch die Lift-Fahrzeuge. Die Lage der I/O-Ebenen beschreibt die Anschlusshöhe der Fördertechnik für die Zu- und Abführung von LE. Dabei können diese auf der untersten oder obersten Ebene sowie vertikal (in y-Richtung) verschoben ausgeführt sein. Je nach Betriebsart der Lifte können diese ausschließlich Einzelspiele (Einlagerung oder Auslagerung) oder Doppelspiele durchführen.

In Multi-Server-Shuttle-Systemen können Ausweichpuffer im Lift für die Lift-Fahrzeuge installiert werden, um Ausweichmanöver zu ermöglichen. Die Ausweichpuffer können einseitig (oben oder unten) oder beidseitig sowie horizontal (in x-Richtung) verschoben ausgeführt sein. Dementsprechend ist die Anzahl der Lift-Fahrzeuge je Lift in Multi-Server-Shuttle-Systemen zu parametrieren und ist insbesondere im Projekt OptiMUSS ein elementarer Untersuchungsgegenstand.

Die weiteren Konfigurationsparameter dienen der Beschreibung des Lift-Fahrzeugs. Diese umfassen die Anzahl, Kapazität und Betriebsart der LAM, welche entweder dediziert (Ein- oder Auslagerung) oder universell (beide Spielarten) ausgestaltet sein kann.

Tabelle 3-2: Morphologischer Kasten der liftbezogenen Konfiguration je Gasse

Parameter	Ausprägungen			
<b>Anzahl der Lifte</b>	1...N			
<b>Position der Lifte</b>	Gassenanfang	Gassenende	In x-Richtung verschoben	
<b>Anzahl der I/O-Ebenen</b>	1...N			
<b>Lage der I/O-Ebenen</b>	Unterste Ebene	Oberste Ebene	In y-Richtung verschoben	
<b>Lift-Betriebsart</b>	Einzelspiel (Einlagerung)	Einzelspiel (Auslagerung)	Doppelspiel (Ein- und Auslagerung)	
<b>Ausweichpuffer für Lift-Fahrzeuge</b>	Vorhanden		Nicht vorhanden	
<b>Position der Ausweichpuffer im Liftschacht</b>	Einseitig (oben)	Einseitig (unten)	Beidseitig (unten und oben)	In x-Richtung verschoben
<b>Anzahl der Lift-Fahrzeuge je Lift</b>	1...N			
<b>Anzahl der LAM je Lift-Fahrzeug</b>	1...N			
<b>LAM-Betriebsart</b>	Dediziert (Einlagerung)	Dediziert (Auslagerung)	Universell (Ein- und Auslagerung)	
<b>LAM-Kapazität</b>	1...N			

Im Rahmen des Forschungsprojekts OptiMUSS werden bis zu sechs Lifte je Gasse betrachtet, die am Anfang, am Ende oder in der Mitte der Gasse angebracht sind. Je Lift werden bis zu drei I/O-Ebenen an der untersten, obersten oder mittleren Ebene berücksichtigt. Die Lifte werden in Einzel- oder Doppelspielart betrieben und enthalten Ausweichpuffer an beiden Seiten. Gemäß der betrachteten Gassenhöhen werden bis zu fünf Lift-Fahrzeuge betrachtet, welche jeweils ein LAM in dedizierter oder universeller Betriebsart und die Kapazität für eine LE haben.

### 3.2.2 Konfiguration der ebenenbezogenen Parameter

Die ebenenbezogenen Parameter definieren die Ausgestaltung einer Ebene bzw. des Horizontaltransports in der Gasse eines Multi-Server-Shuttle-Systems. Die Anzahl der Übergabepuffer je Lift und Ebene bestimmt die Kapazität für LE, die im Falle einer Einlagerung von einem Lift-Fahrzeug und bei einer Auslagerung von einem Shuttle-Fahrzeug zur Übergabe abgelegt werden. Die Verwendung der Übergabepuffer kann dabei entweder dediziert (Ein- oder Auslagerung) oder universell (Ein- und Auslagerung) ausgestaltet sein und richtet sich nach der Betriebsart des jeweiligen Liftes.

Wie im Lift können auch in der Ebene eines Multi-Server-Shuttle-Systems Ausweichpuffer für Shuttle-Fahrzeuge installiert werden. Diese können einseitig (vorne oder hinten) oder beidseitig sowie quer (in z-Richtung) verschoben ausgeführt sein. In Multi-Server-Shuttle-Systemen ist somit die Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge je Ebene zu definieren. Die Kapazität eines Shuttle-Fahrzeugs definiert die Anzahl der LE, die transportiert werden kann.

Ein weiterer Konfigurationsparameter der Ebene definiert die Lagertiefe und somit die Anzahl der LE, die in einen Lagerkanal eingelagert werden kann.

Tabelle 3-3 fasst die Freiheitsgrade und ihre möglichen Ausprägungen in einem morphologischen Kasten zusammen.

Tabelle 3-3: Morphologischer Kasten der ebenenbezogenen Konfiguration je Gasse

Parameter	Ausprägungen			
<b>Anzahl Übergabepuffer je Lift und Ebene</b>	1...N			
<b>Verwendung der Übergabepuffer</b>	Dediziert (Einlagerung)	Dediziert (Auslagerung)	Universell (Ein- und Auslagerung)	
<b>Ausweichpuffer für Shuttle-Fahrzeuge</b>	Vorhanden		Nicht vorhanden	
<b>Position der Ausweichpuffer in der Ebene</b>	Einseitig (vorne)	Einseitig (hinten)	Beidseitig (vorne und hinten)	In z-Richtung verschoben
<b>Anzahl Shuttle-Fahrzeuge je Ebene</b>	1...N			
<b>Kapazität je Shuttle-Fahrzeug</b>	1...N			
<b>Lagertiefe</b>	1...N			

Im Projekt OptiMUSS wird je Lift und Ebene ein Übergabepuffer betrachtet, welcher in Abhängigkeit von der Liftbetriebsart entweder dediziert oder universell verwendet wird. Ausweichpuffer für Shuttle-Fahrzeuge finden sich zu beiden Seiten der Ebene. Entsprechend der berücksichtigten Gassenlänge wird die Ebene mit bis zu fünf Shuttle-Fahrzeugen konfiguriert. Dabei ist die Kapazität eines Shuttle-Fahrzeugs auf eine LE begrenzt. Die Lagertiefe lässt sich einfach- oder mehrfach tief mit bis zu vier LE konfigurieren.

### 3.3 Freiheitsgrade der Steuerung

Je nach Ausprägung der Parameter fallen die Auswirkungen auf die Steuerung von Multi-Server-Shuttle-Systemen unterschiedlich aus. Die Lagerkonfiguration definiert somit die Freiheitsgrade der Steuerung und ist bei der Auswahl der Steuerungsstrategien zu berücksichtigen. Die Grundlage für die Analyse der Freiheitsgrade der Steuerung bilden die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen lift- und ebenenbezogenen Konfigurationsparametern. Diese lassen sich in die folgenden übergeordneten Parameter zusammenfassen:

- Lifte (Anzahl, Betriebsart und Position in der Gasse)
- I/O-Ebenen (Anzahl und Lage im Lift)
- Ausweichpuffer im Lift (Verfügbarkeit und Position im Lift)
- Ausweichpuffer in der Ebene (Verfügbarkeit und Position in der Ebene)
- Lift-Fahrzeuge (Anzahl je Liftschacht)
- Shuttle-Fahrzeuge (Anzahl je Ebene)
- Lagertiefe (Anzahl LE je Kanal)

Mithilfe der Lifte werden die LE von der I-Ebene auf die Einlagerungsebene (Einlagerung) sowie von der Auslagerungsebene auf die O-Ebene (Auslagerung) transportiert. Dabei wird über die Anzahl, Betriebsart und Position der Lifte die Zahl der gleichzeitig möglichen Ein- und Auslagerungen in der Ebene definiert und folglich werden Strategien für die Zuweisung und Reihenfolge der Aufträge für die Shuttle-Fahrzeuge benötigt. Über die Anzahl und Lage der I/O-Ebenen werden die Aufnahme- und Abgabestellen von LE im Lift festgelegt. Hierdurch sind wiederum Zuweisungs- und Reihenfolgestrategien für die Aufträge der Lift-Fahrzeuge notwendig.

Falls Ausweichpuffer im Lift oder in der Ebene verfügbar sind, können die Lift- bzw. Shuttle-Fahrzeuge anderen Fahrzeugen ausweichen, sodass alle Lift- und Shuttle-Fahrzeuge in der Lage sind, sämtliche Ebenen im Lift und Lagerfächer in der Ebene anzufahren. Dies bedingt Strategien zur Auftragszuweisung durch die Einbindung aller Fahrzeuge und Strategien zur Auftragsausführung durch die Berücksichtigung von Ausweichmanövern.

Die einzelnen Lift- und Shuttle-Fahrzeuge führen im Zusammenspiel die TA durch. Abbildung 3-1 zeigt die notwendigen Prozessschritte einer Einlagerung, die von den Lift- und Shuttle-Fahrzeugen ausgeführt werden. Abbildung 3-2 hingegen stellt die Prozessschritte der Fahrzeuge bei einer Auslagerung dar.

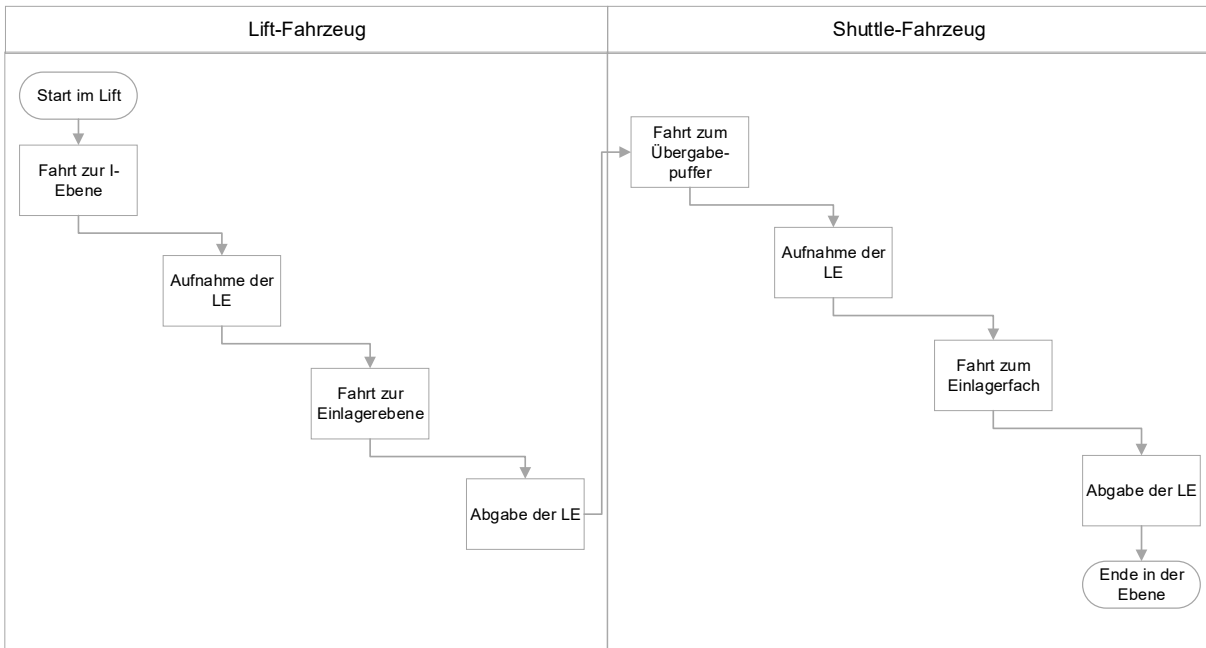


Abbildung 3-1: Flussdiagramm einer Einlagerung

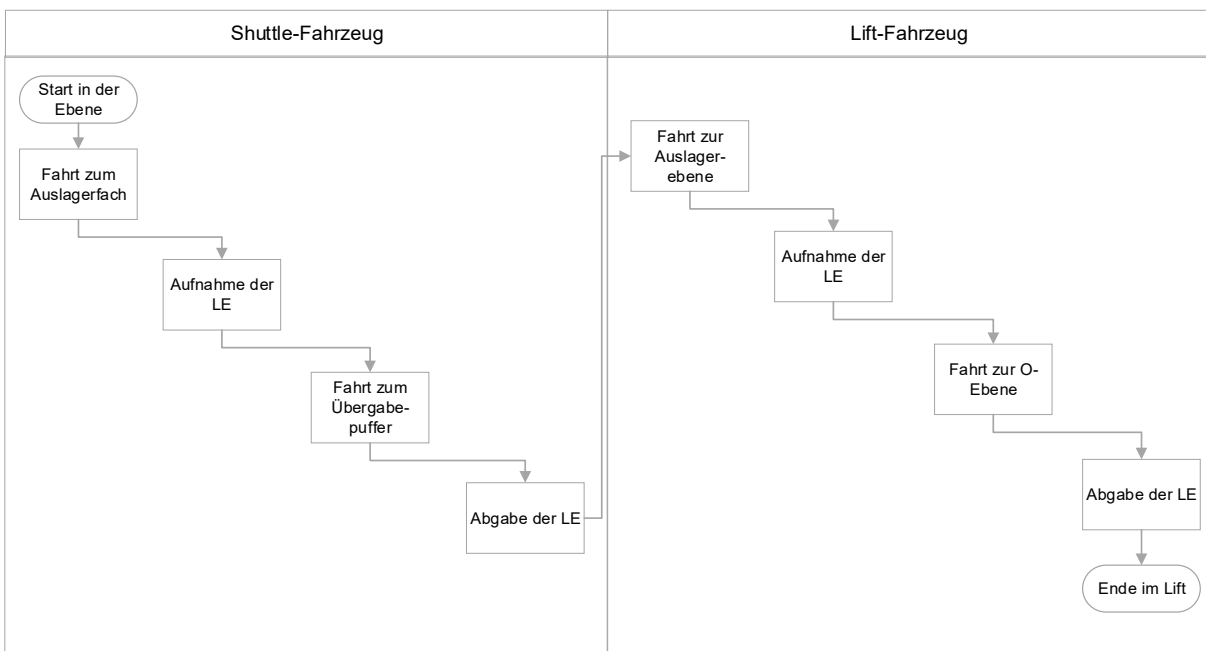


Abbildung 3-2: Flussdiagramm einer Auslagerung

Die Anzahl der eingesetzten Lift-Fahrzeuge je Liftschacht und Shuttle-Fahrzeuge je Ebene definiert die gleichzeitig durchführbaren TA im Lift und in der Ebene. Dies betrifft zum einen die Strategien zur Auftragszuweisung, um die TA effizient auf die Lift- und Shuttle-Fahrzeuge zu verteilen, zum anderen beeinflusst es die Strategien zur Auftragsausführung, da Kollisionen und Blockaden verhindert werden müssen.



Die Lagertiefe beschreibt die Anzahl der LE je Kanal. Bei mehrfachtiefer Lagerung kann die auszulagernde LE verdeckt sein, sodass Strategien für die Umlagerung notwendig sind. Abbildung 3-3 zeigt die Prozessschritte eines Shuttle-Fahrzeugs im Falle einer Umlagerung mit anschließender Auslagerung anhand eines Flussdiagramms.

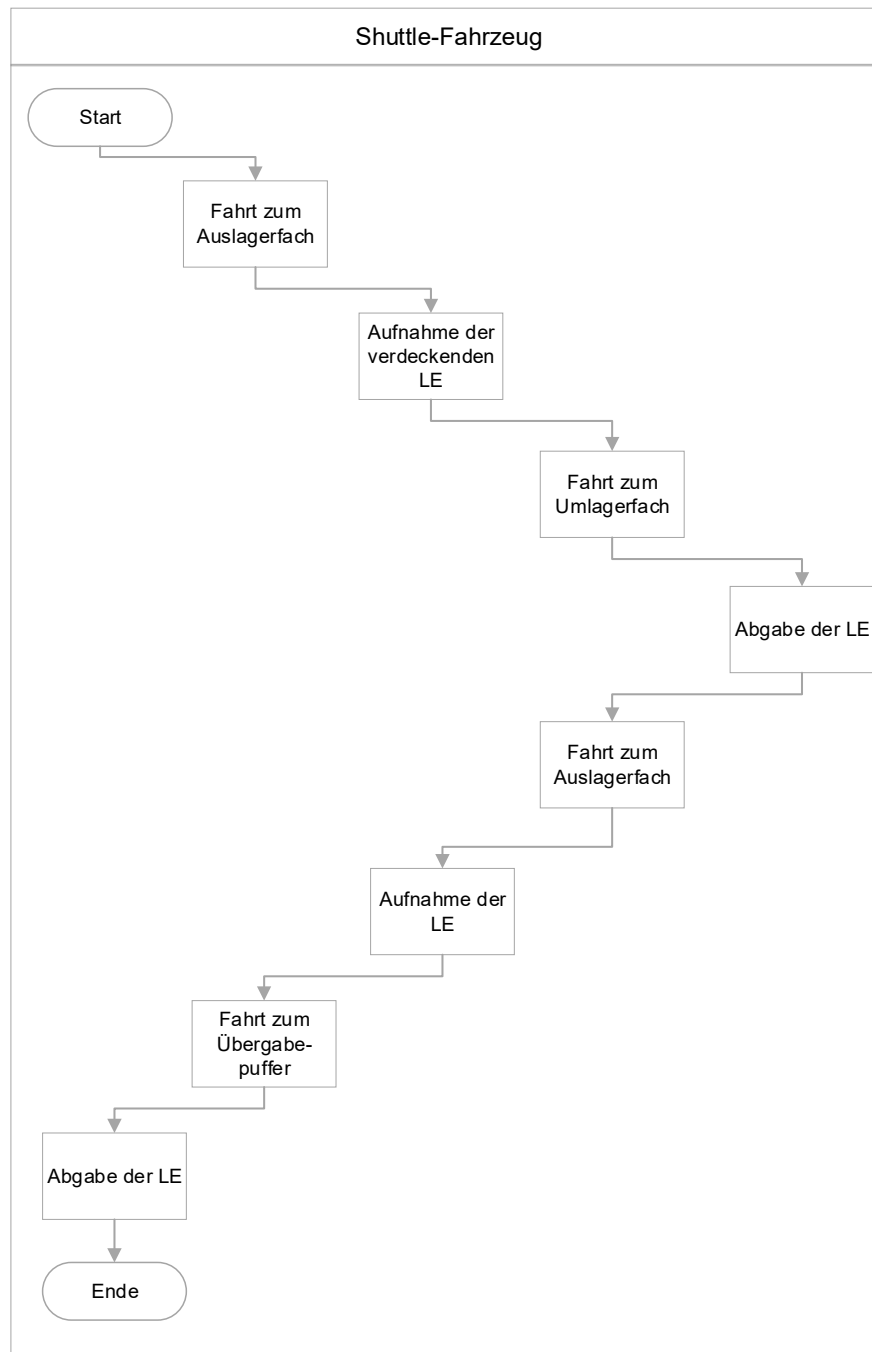


Abbildung 3-3: Flussdiagramm einer Umlagerung mit anschließender Auslagerung

Tabelle 3-4 zeigt zusammenfassend den Katalog der Freiheitsgrade der Steuerung in Abhängigkeit von den übergeordneten Konfigurationsparametern. Je nach Ausprägung der Konfigurationsparameter sind demnach verschiedene Strategien zur Steuerung der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge nötig.

Tabelle 3-4: Katalog der Freiheitsgrade der Steuerung je Konfigurationsparameter

	Lifte	I/O-Ebenen	Ausweichpuffer im Lift	Lift-Fahrzeuge	Ausweichpuffer in der Ebene	Shuttle-Fahrzeuge	Lager-tiefe
<b>Auftragszuweisung der Lift-Fahrzeuge</b>		X	X	X			
<b>Auftragszuweisung der Shuttle-Fahrzeuge</b>	X				X	X	
<b>Auftragsreihenfolge der Lift-Fahrzeuge</b>		X					
<b>Auftragsreihenfolge der Shuttle-Fahrzeuge</b>	X						
<b>Auftragsausführung der Lift-Fahrzeuge</b>			X	X			
<b>Auftragsausführung der Shuttle-Fahrzeuge</b>					X	X	
<b>Umlagerung in der Ebene</b>							X

## 4 Entwicklung von Steuerungsstrategien

Dieses Kapitel umfasst die Strategien zur Steuerung von Multi-Server-Shuttle-Systemen, deren Ausprägungen in Kapitel 3 identifiziert wurden. Die Grundlage bilden die in Kapitel 2 vorgestellten Ansätze zur Steuerung von Multi-Server-Systemen aus der Literatur. Zunächst werden die verschiedenen Arten der Auftragszuweisung, bestehend aus den zwei aufeinanderfolgenden Prozessen der Auftragsvergabe und -zuordnung, beschrieben. Anschließend werden die Verfahren zur Ausführung der Aufträge vorgestellt.

### 4.1 Vergabe von Aufträgen

Im Rahmen der Auftragsvergabe werden alle Fahrzeuge identifiziert, die den jeweiligen Auftrag grundsätzlich ausführen können. Der Zweck der Auftragsvergabe ist somit eine Vorauswahl an Fahrzeugen für jeden Auftrag zu bestimmen. Dabei kann je nach Ausprägung und Komplexität des Multi-Server-Shuttle-Systems die Vergabe von Aufträgen unterschiedlich ausgestaltet sein. Abbildung 4-1 stellt die verschiedenen Arten der Auftragsvergabe und deren mögliche Vorauswahl an Fahrzeugen dar.

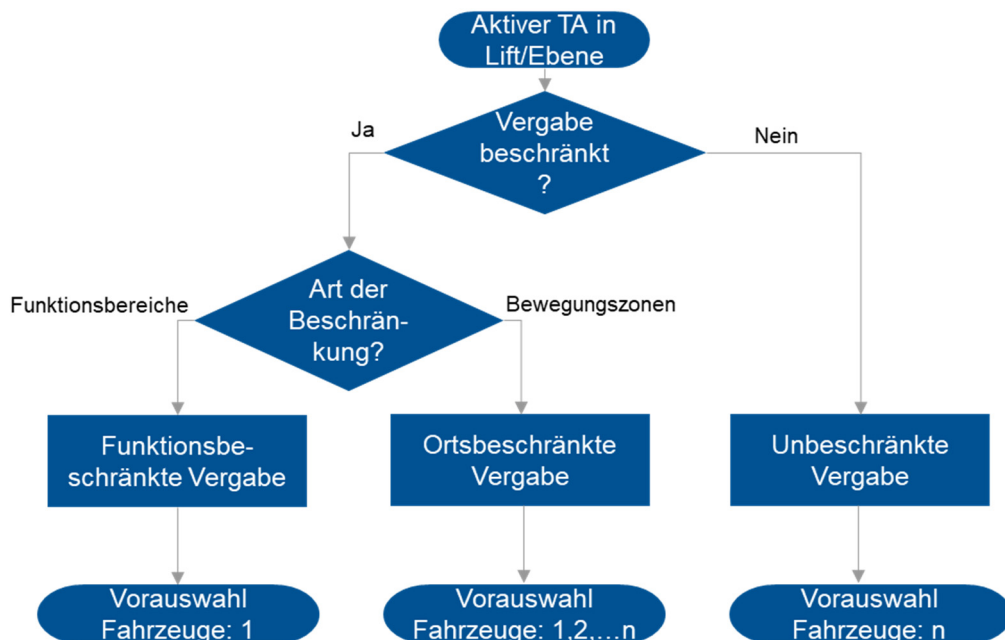


Abbildung 4-1: Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen

Beginnend mit einem aktiven TA für einen Lift oder eine Ebene wird zunächst geprüft, ob die Auftragsvergabe beschränkt ist. Bei unbeschränkter Vergabe ist es grundsätzlich jedem Fahrzeug erlaubt, den Auftrag auszuführen, sodass die Vorauswahl  $n$  Fahrzeuge umfasst. Im Falle einer beschränkten Vergabe wird zwischen zwei Arten – der Beschränkung nach Funktionsbereiche oder nach Bewegungszonen – unterschieden. Während bei einer funktionsbeschränkten Vergabe ausschließlich das Fahrzeug des entsprechenden Funktionsbereichs ausgewählt werden kann, variiert bei ortsbeschränkter Vergabe die Anzahl der vorausgewählten Fahrzeuge je nach eingebundener Bewegungszonen zwischen  $1 \dots n$  Fahrzeugen.

#### 4.1.1 Funktionsbeschränkte Vergabe

Im Rahmen der funktionsbeschränkten Vergabe wird die Ebene bzw. der Lift in Funktionsbereiche unterteilt und die Bereiche den einzelnen Shuttle- und Lift-Fahrzeugen zugeteilt. Somit ist jedes Fahrzeug für die Ver- und Entsorgung des eigenen Funktionsbereichs zuständig. Die Einhaltung der Funktionsbereiche wird über die Auftragsstruktur gewährleistet. Es befinden sich Aufnahme- und Abgabeort eines Auftrags stets im selben Funktionsbereich, sodass das entsprechend zuständige Fahrzeug den jeweiligen Auftrag vollständig ausführen kann. Falls der Aufnahme- oder Abgabeort an einer Bereichsgrenze liegt, wird über eine Reservierung des Grenzbereichs und die Reihenfolgestrategie FCFS ein Blockieren bzw. Zusammenstoßen von zwei Fahrzeugen verhindert. Abbildung 4-2 zeigt beispielhaft einen Abschnitt einer Lagerebene, welcher in zwei Funktionsbereiche mit je einem Shuttle-Fahrzeug aufgeteilt ist. Jeder Abschnitt enthält Übergabepuffer und Lagerfächer für die Auf- und Abgabe von Behältern.

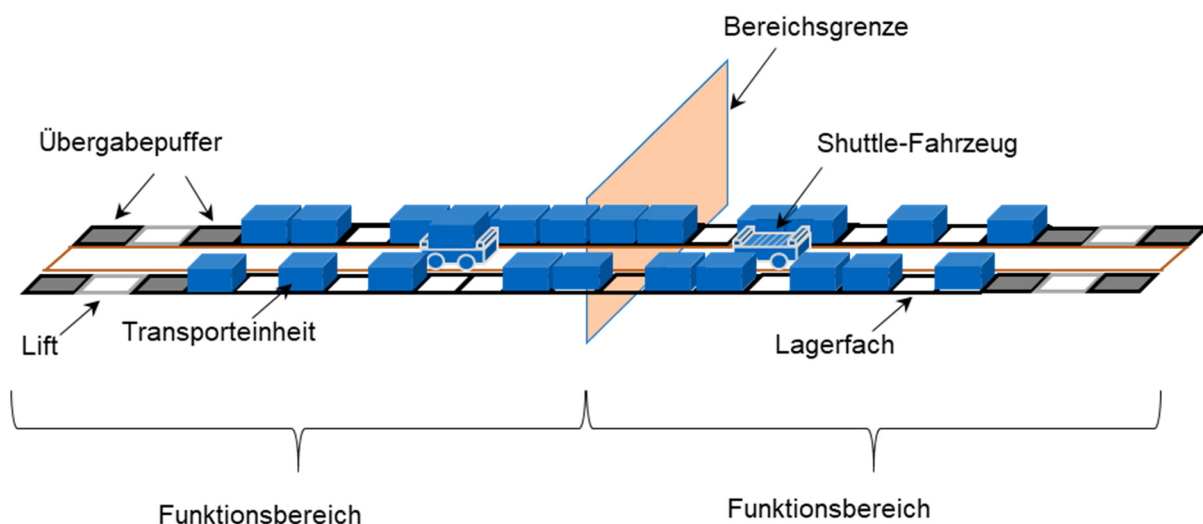


Abbildung 4-2: Funktionsbeschränkte Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen

### 4.1.2 Ortsbeschränkte Vergabe

In der ortsbeschränkten Vergabe wird die Ebene bzw. der Lift in Bewegungszonen aufgeteilt. Jedes Fahrzeug hält sich ausschließlich in der zugewiesenen Zone auf, so dass Kollisionen vermieden werden können. Zonenübergreifende Transporte sind mithilfe von Transferpuffern an den Zonengrenzen möglich. Diese werden über eine Reservierungslogik nach FCFS zugewiesen. In Abbildung 4-3 ist exemplarisch ein Abschnitt einer Ebene dargestellt, welcher in Zonen unterteilt ist.

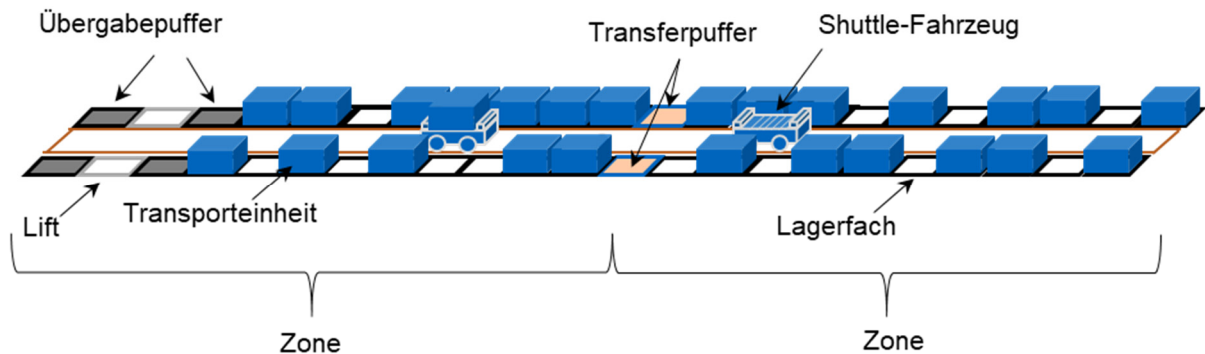


Abbildung 4-3: Ortsbeschränkte Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen

### 4.1.3 Unbeschränkte Vergabe

Bei einer unbeschränkten Vergabe ist es prinzipiell jedem Fahrzeug möglich, einen Auftrag auszuführen, da sich alle Fahrzeuge frei bewegen können. Zur Vermeidung von Kollisionen und Blockierungen setzt diese Form der Vergabe eine Anwendung von Auftragsausführungsstrategien voraus. Abbildung 4-4 zeigt den Abschnitt einer Ebene mit unbeschränkter Auftragsvergabe. An beiden Enden sind Ausweichpuffer angebracht, sodass alle Lagerfächer und Lifte durch die Shuttle-Fahrzeuge erreicht werden können.

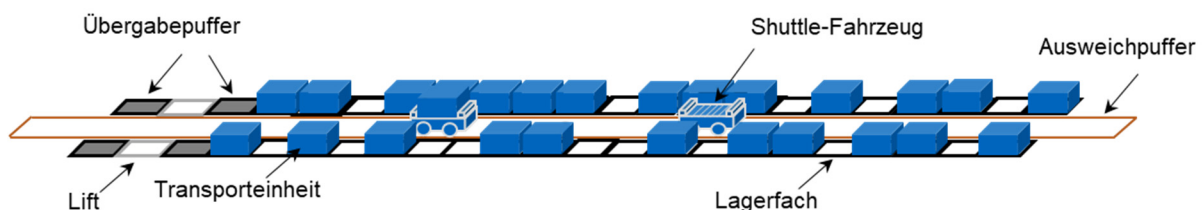


Abbildung 4-4: Unbeschränkte Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen

## 4.2 Zuordnung von Aufträgen

In der Auftragszuordnung werden die TA den einzelnen Lift- und Shuttle-Fahrzeugen zugeteilt. Abbildung 4-5 zeigt die verschiedenen Zuordnungsarten in Abhängigkeit von der getroffenen Vorauswahl. Während innerhalb der funktions- und ortsbeschränkten Vergabe die Zuordnung der Aufträge zu den Fahrzeugen bereits definiert wird, unterscheidet die unbeschränkte Vergabe zwei Arten der Zuordnung, die nachfolgend beschrieben werden.

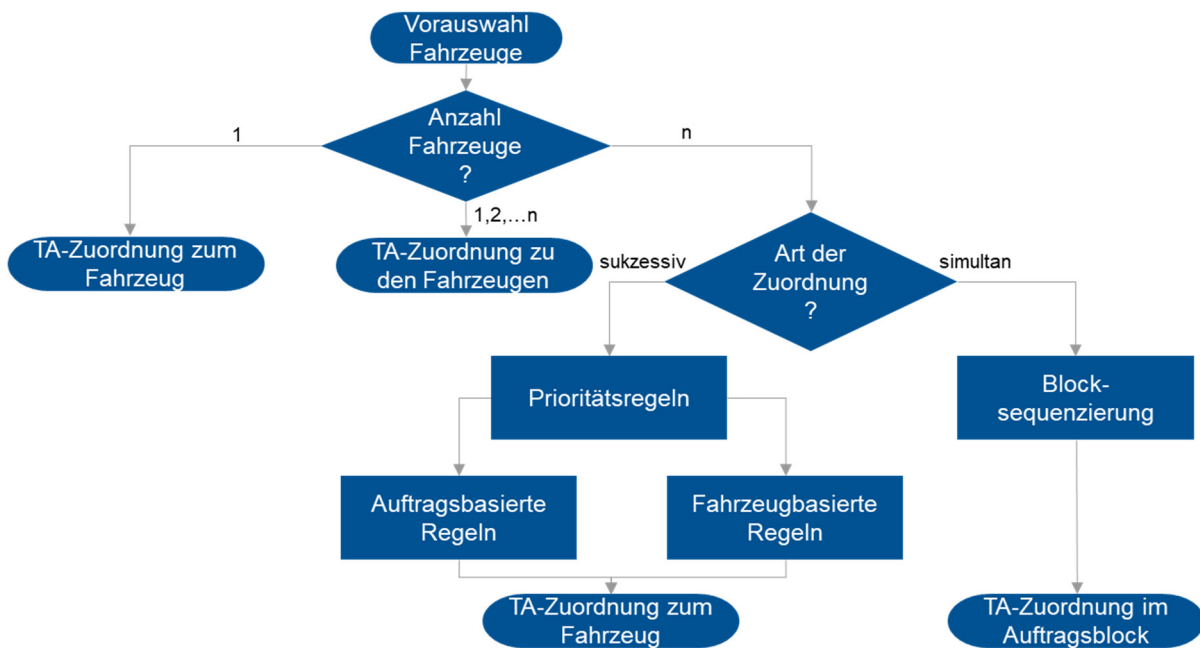


Abbildung 4-5: Auftragszuordnung in Multi-Server-Shuttle-Systemen

### 4.2.1 Sukzessive Zuordnung

Die sukzessive Zuordnung teilt einen Auftrag nach dessen Aktivierung sofort einem Fahrzeug zu. Die Steuerung erfolgt in diesem Fall auf Basis von Prioritätsregeln, welche sich in auftrags- und fahrzeugbasierte Regeln gliedern und nachfolgend erläutert werden.

#### Random Job (RJ)

Diese Prioritätsregel teilt dem Fahrzeug einen zufälligen Auftrag zu. Es werden keine weiteren Kriterien beachtet.

#### First-Come-First-Served (FCFS)

Dem Fahrzeug wird der nächste Auftrag aus der Auftragsliste zugeteilt.

**Nearest Job (NJ)**

Das Fahrzeug erhält den Auftrag, dessen Startposition sich am nächsten zur aktuellen Fahrzeugposition befindet.

**Random Vehicle (RV)**

Dem Auftrag wird ein zufälliges Fahrzeug zugewiesen. Es werden keine weiteren Kriterien beachtet.

**Least Utilized Vehicle (LUV)**

Bei Anwendung dieser Regel wird das Fahrzeug ausgewählt, welches zum momentanen Zeitpunkt die geringste Auslastung vorweist. Die Auslastung (Utilization)  $U_i$  wird über die gesamte Ruhezeit der Fahrzeuge  $i$  gemessen. Die Ruhezeit bezeichnet dabei die Zeitspanne, in welcher dem Fahrzeug kein Auftrag zugewiesen war. Das Fahrzeug  $j$ , das in Summe die geringste Auslastung  $U_j$  verzeichnet, wird für den Auftrag ausgewählt:

$$U_j = \min_{\forall i} \{U_i\} \quad (4-1)$$

**Longest Idle Vehicle (LIV)**

In dieser Prioritätsregel werden vorrangig Fahrzeuge ausgewählt, die momentan frei verfügbar (idle) sind. Falls ein oder mehrere Fahrzeuge im Zustand idle sind, wird aus dieser Menge das Fahrzeug  $j$  ausgewählt, welches aktuell die längste Zeit im Zustand idle  $t_j$  aufweist:

$$t_j = \max_{\forall i} \{t_i\} \quad (4-2)$$

mit

$$t_i = T_c - T_i \quad (4-3)$$

wobei  $T_c$  die aktuelle Zeit ist und  $T_i$  der Zeitpunkt, zu dem Fahrzeug  $i$  seinen letzten zugewiesenen Auftrag beendet hat.

**Double Cycle Priority (DCP)**

Diese Regel priorisiert die Ausführung von Doppelspielen. Dementsprechend wird nach einem Auslagerungsauftrag möglichst ein Einlagerungsauftrag zugewiesen.

### Nearest Vehicle (NV)

Bei dieser Prioritätsregel ist die Distanz eines jeden Fahrzeugs zum Startort des Auftrags relevant. Werden nur die frei verfügbaren Fahrzeuge betrachtet, ist die Distanz zwischen der aktuellen Position des Fahrzeugs und der Startposition des Auftrags entscheidend. Es wird das Fahrzeug  $j$  aus allen Fahrzeugen  $i$  ausgewählt, dessen Position den geringsten Abstand  $d_j$  zum Auftragsstartort aufweist:

$$d_j = \min_{\forall i} \{d_i\} \quad (4-4)$$

### Nearest Vehicle with Task Maximum (NVTM)

Diese Prioritätsregel ist eine Modifikation der Regel NV und hat das Ziel, die Auslastung der Fahrzeuge gleichmäßig zu gestalten. Dies wird über ein definiertes Maximum an Aufträgen (Task)  $T_{max}$  pro Fahrzeug gesteuert. Hat das über die Regel NV ausgewählte Fahrzeug  $j$  bereits  $T_j$  Aufträge zugewiesen bekommen und gilt

$$T_j \geq T_{max} \quad (4-5)$$

wird dieses Fahrzeug nicht weiter betrachtet und erneut das Fahrzeug mit der kürzesten Distanz zum Startort gesucht.

### Nearest Vehicle with Idle Priority (NVIP)

Die Regel entspricht einer modifizierten Variante der Prioritätsregel NV, die darauf abzielt, neben der Minimierung der Wegstrecken eine gleichmäßige Auslastung der Fahrzeuge zu erreichen. Dabei werden zunächst nur Fahrzeuge, welche momentan verfügbar sind, in Betracht gezogen und daraus das Fahrzeug mit der geringsten Distanz zum Startort ausgewählt.

## 4.2.2 Simultane Zuordnung

Innerhalb der simultanen Zuordnung wird basierend auf der Blocksequenzierung je nach gewählter Blockgröße eine entsprechende Anzahl an Aufträgen parallel geplant und anschließend durch die Fahrzeuge ausgeführt. Nach Abschluss des letzten Auftrags wird der Auftragsblock aus der Auftragsliste entfernt und in der nächsten Iteration der nächste Block geplant.

Die Planung eines Auftragsblocks umfasst die Zuteilung eines Auftrags zu einem 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 (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.

Nach der Planung eines Auftragsblocks erfolgt die Ausführung durch die Fahrzeuge. Für jeden Auftrag wird zunächst bestimmt, ob dieser sofort ausgeführt werden kann oder ob Wartezeiten eingehalten werden müssen, um Blockaden mit anderen 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 Fahrzeugen zu vermeiden.

Abbildung 4-6 zeigt exemplarisch eine Ebene mit drei Shuttle-Fahrzeugen ohne Beschränkung. Die Zuteilung der Aufträge zu den Shuttle-Fahrzeugen basiert auf einer sukzessiven oder simultanen Zuordnung.

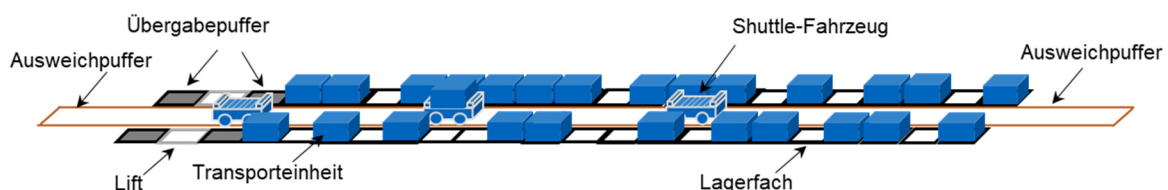


Abbildung 4-6: Sukzessive bzw. simultane Zuordnung der Aufträge in Multi-Server-Shuttle-Systemen

## 4.3 Ausführung von Aufträgen

Um Kollisionen und Blockaden zwischen Fahrzeugen zu vermeiden, werden Steuerungsstrategien zur Auftragsausführung entwickelt. Diese können als Blockreservierung oder Abstandsregelung ausgestaltet sein. Beide Strategien werden nachfolgend erläutert.

### 4.3.1 Blockreservierung

Im Rahmen der Blockreservierung wird die Fahrschiene in Streckenabschnitte (Blöcke) unterteilt und deren Belegung erfasst. Dabei darf ein solcher Block jeweils nur von einem Fahrzeug gleichzeitig befahren werden. Das Befahren ist ausschließlich

nach vorherigem Reservieren des Blocks möglich. Abbildung 4-7 stellt beispielhaft die Unterteilung der Fahrschiene einer Ebene in Blöcken dar.

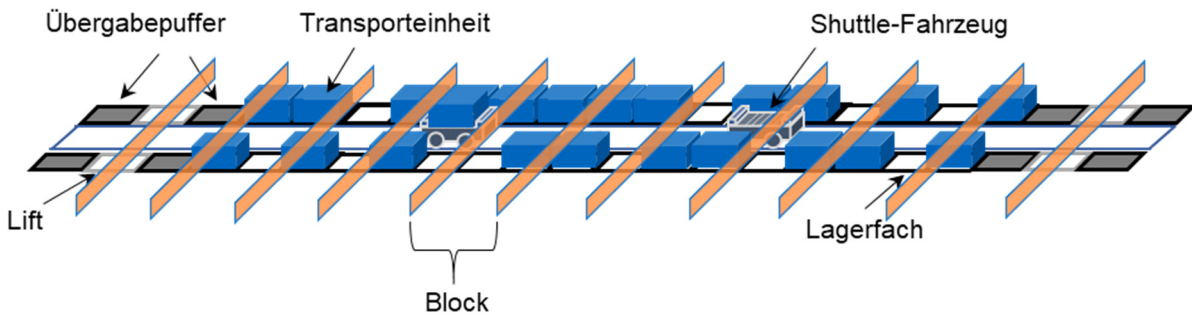


Abbildung 4-7: Ausführung der Aufträge mittels einer Blockreservierung

### 4.3.2 Abstandsregelung

Zur Vermeidung von Kollisionen wird in der Abstandsregelung ein Ausweichprotokoll aktiviert, sobald zwei Fahrzeuge einen bestimmten Abstand unterschreiten. Priorisiert wird immer das Fahrzeug, dessen Zielposition näher liegt (Abbildung 4-8).

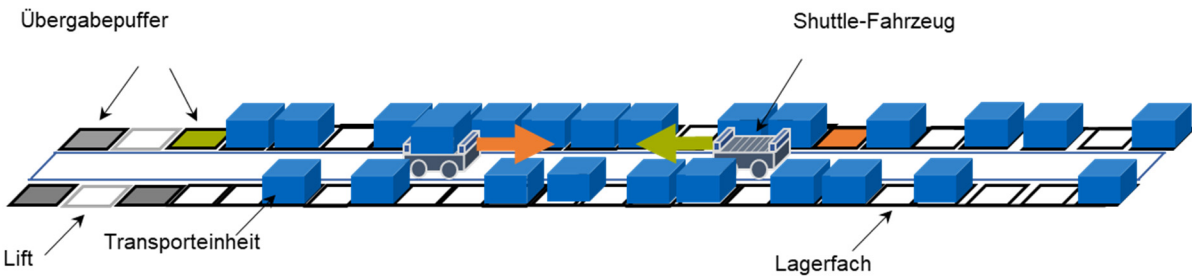


Abbildung 4-8: Ausführung der Aufträge mittels einer Abstandsregelung

## 5 Modellierung und Implementierung eines Simulationsmodells

In diesem Kapitel wird zunächst die Modellierung der Systemkomponenten eines Multi-Server-Shuttle-Systems beschrieben. Anschließend werden die Dynamik der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge sowie die Lagerprozesse modelliert. Schließlich wird die Implementierung des Simulationsmodells erläutert.

### 5.1 Modellierung der Systemkomponenten

Shuttle-Lagersysteme setzen sich aus einer Vielzahl von Systemkomponenten zusammen. Dabei umfasst ein Shuttle-System eine oder mehrere Lagergassen, die wiederum aus Ebenen und Liften bestehen. In der Ebene verfahren die Shuttle-Fahrzeuge entlang einer Schiene, um TE in die Lagerfächer ein- bzw. auszulagern. Im Lift verfahren Lift-Fahrzeuge entlang eines Schachts und bedienen die Zu- und Abführungen der TE. Dabei sind die Ebenen und Lifte durch Übergabepuffer miteinander verkettet. Abbildung 5-1 stellt den Aufbau eines Shuttle-Systems aus den Systemkomponenten hierarchisch dar.

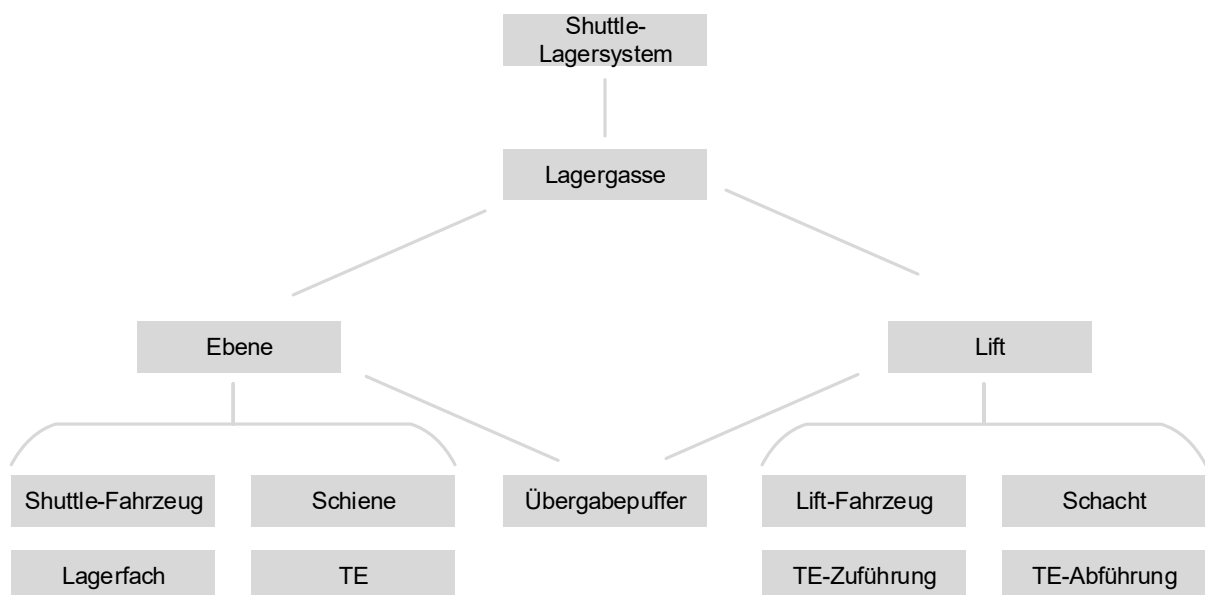


Abbildung 5-1: Systemkomponenten eines Shuttle-Systems

#### 5.1.1 Ebene

Abbildung 5-2 zeigt die Modellierung einer Ebene in einem Shuttle-System anhand der einzelnen Systemkomponenten und deren Anordnung. Demnach verfährt das Shuttle-

Fahrzeug auf der Fahrschiene in horizontaler Richtung und führt zu beiden Seiten Ein- und Auslagerungen von TE in und aus den Lagerfächern durch. In jeder Ebene befinden sich Übergabepuffer, welche die Verknüpfung zu einem Lift darstellen.

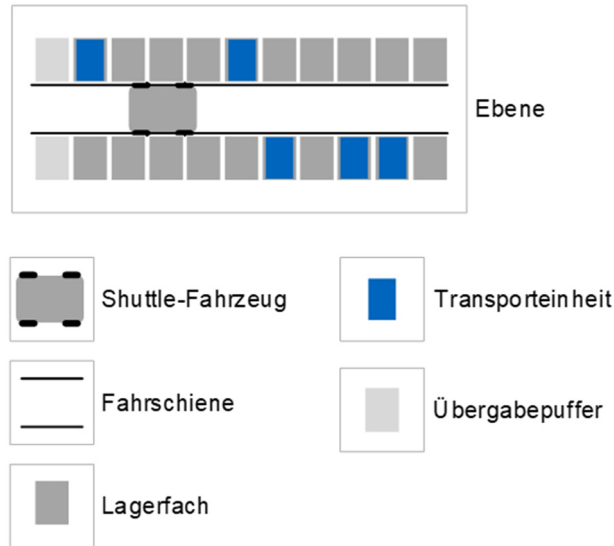


Abbildung 5-2: Modellierung einer Ebene in einem Shuttle-System

### 5.1.2 Lift

In Abbildung 5-3 ist die Modellierung eines Lifts in einem Shuttle-System dargestellt. Das Lift-Fahrzeug verfährt entlang des Liftschachts in vertikaler Richtung und führt Transporte von der TE-Zuführung auf einen Übergabepuffer bzw. von einem Übergabepuffer auf die TE-Abführung durch.

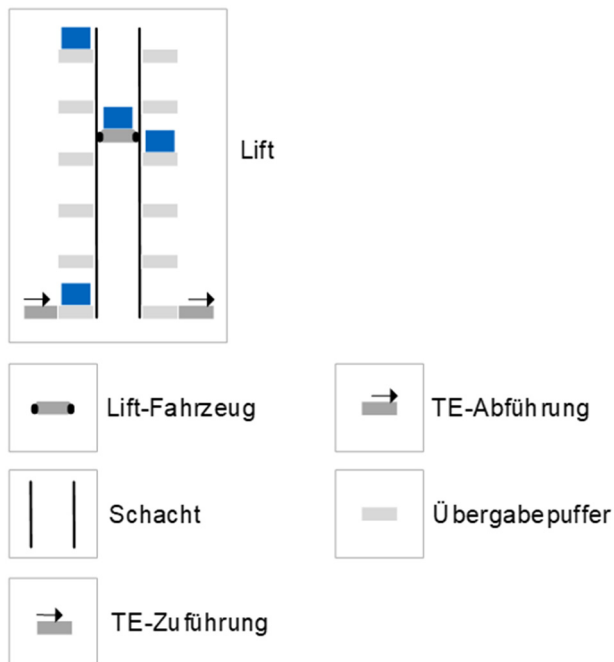


Abbildung 5-3: Modellierung eines Lifts in einem Shuttle-System

## 5.2 Modellierung der Fahrzeugdynamik

Zur Durchführung von TA verfahren die Shuttle- und Lift-Fahrzeuge auf einer Schiene bzw. im Schacht. Die Bewegung der Fahrzeuge wird anhand der Beschleunigung, Maximalgeschwindigkeit und Verzögerung beschrieben. Dabei ist die Geschwindigkeit, auf welche die Fahrzeuge beschleunigen, abhängig von der zurückzulegenden Strecke. Dementsprechend ist eine Beschleunigung auf Maximalgeschwindigkeit und somit eine Trapezfahrt möglich, falls gilt:

$$s_{tot} \geq s_{acc} + s_{dec} \quad (5-1)$$

$$s_{acc/dec} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{max}^2}{a_{acc/dec}} \quad (5-2)$$

Die Variablen  $s_{acc}$  und  $s_{dec}$  bezeichnen jeweils die Strecken, die das Fahrzeug zum Beschleunigen von 0 m/s auf Maximalgeschwindigkeit  $v_{max}$  bzw. zum Bremsen von  $v_{max}$  auf 0 m/s benötigt. Die Variablen  $a_{acc}$  und  $a_{dec}$  bezeichnen die Beschleunigung und Verzögerung des Fahrzeugs.

Falls eine Beschleunigung auf die maximale Geschwindigkeit nicht möglich ist, handelt es sich um eine Dreiecksfahrt. Die Geschwindigkeit wird anhand der nachfolgenden Formel berechnet:

$$v = \sqrt{2 \cdot s_{tot} \cdot \frac{a_{acc} \cdot a_{dec}}{a_{acc} + a_{dec}}} \quad (5-3)$$

Die Geschwindigkeit-Zeit-Diagramme sind für beide Fälle und  $a_{acc} = a_{dec}$  in Abbildung 5-4 dargestellt.

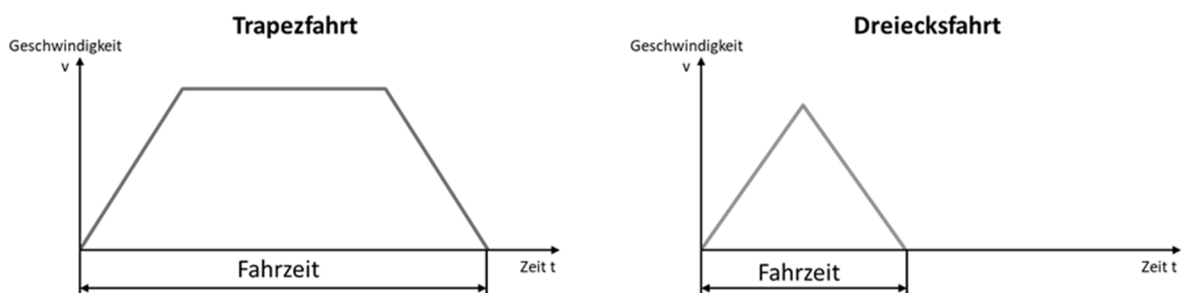


Abbildung 5-4:  $v$ - $t$ -Diagramm einer Trapez- und Dreiecksfahrt für  $a_{acc} = a_{dec}$

## 5.3 Modellierung der Lagerprozesse

Die zu modellierenden Lagerprozesse gliedern sich in Ein-, Aus-, sowie Umlagerungen und werden nachfolgend erläutert.

### 5.3.1 Einlagerung

Bei einer Einlagerung wird die TE über die TE-Zuführung dem Shuttle-System zugeführt und anschließend auf den Übergabepuffer befördert. Von dort übernimmt ein Lift-Fahrzeug, welches die TE auf eine Ebene transportiert und auf den entsprechenden Übergabepuffer ablegt. Daraufhin transportiert das Shuttle-Fahrzeug die TE in das Lagerfach. Die am Einlagerungsprozess beteiligten Systemkomponenten sind schematisch in Abbildung 5-5 dargestellt.



Abbildung 5-5: Einlagerungsprozess einer TE

### 5.3.2 Auslagerung

Die Auslagerung startet am Lagerfach mit dem Abtransport der TE auf den Übergabepuffer durch das Shuttle-Fahrzeug. Von dort wird die TE durch das Lift-Fahrzeug auf den Übergabepuffer gelegt, welcher mit der TE-Abführung verbunden ist und damit das Shuttle-System verlässt. Abbildung 5-6 stellt die am Auslagerungsprozess beteiligten Systemkomponenten schematisch dar.



Abbildung 5-6: Auslagerungsprozess einer TE

### 5.3.3 Umlagerung

Bei mehrfachtiefer Lagerung wird im Falle einer Blockierung der auszulagernden TE durch eine weitere TE eine Umlagerung durchgeführt. Diese entspricht einer Aufnahme der blockierenden TE durch das Shuttle-Fahrzeug mit anschließender Abgabe in ein alternatives Lagerfach (Abbildung 5-7).



Abbildung 5-7: Umlagerungsprozess einer TE

## 5.4 Implementierung des Simulationsmodells

Für die Durchsatzanalyse von Multi-Server-Shuttle-Systemen wird die Modellierung in der Simulationsumgebung *Tecnomatix Plant Simulation* implementiert und die entwickelten Steuerungsstrategien werden in das Simulationsmodell eingebunden.

### 5.4.1 Funktionsmodule

Im Simulationsmodell sind insgesamt sieben Funktionsmodule enthalten, welche eine simulationsbasierte Durchsatzanalyse von Multi-Server-Shuttle-Systemen ermöglichen. Die Module sind als *Netzwerk* in der Simulationsumgebung umgesetzt und in Abbildung 5-8 dargestellt.



Abbildung 5-8: Funktionsmodule des Simulationsmodells

### Funktionsmodul Parameter

Dieses Funktionsmodul dient zur Parametrierung des Multi-Server-Shuttle-Systems. Folglich werden darin alle lagerspezifischen Parameter definiert. Dies beinhaltet insbesondere die Parameter zur Einstellung der

- Systemkonfiguration:
  - Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge je Ebene
  - Anzahl der Lift-Fahrzeuge je Lift
  - Anzahl der Lifte in der Gasse
  - Position der Lifte in der Gasse
  - Lagertiefe
- Dimensionierung:
  - Anzahl der Ebenen einer Gasse
  - Länge der Ebenen einer Gasse
- geometrischen Konfiguration:

- Abmessungen innerhalb der Ebene, wie die Ebenenhöhe, Lagerplätze und Behälter
- Abmessungen innerhalb des Lifts, wie die Liftbreite
- Abmessungen der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge
- Fahrzeugkinematik
  - Geschwindigkeit der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge
  - Beschleunigung der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge
  - Lastwechselzeiten der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge
- Randbedingung:
  - Lagerfüllgrad in der Gasse
  - Auftragsstruktur

### **Funktionsmodul Layout**

Mithilfe dieses Funktionsmoduls lassen sich im Simulationsmodell auf Basis der vor-  
eingestellten Parameter verschiedene Ausprägungen von Multi-Server-Shuttle-Systemen erstellen. Zunächst werden die Lagerebenen und Behälterlifte entsprechend der eingestellten Anzahl und Ausgestaltung erstellt. Schließlich werden die Lagerebenen und Behälterlifte miteinander verknüpft, sodass eine vollständige Lagergasse entsteht. Abschließend werden die einzelnen Ebenen der Gasse gemäß eingestelltem Lagerfüllgrad mit Behältern befüllt. Des Weiteren werden im Layout-Funktionsmodul sämtliche Informationen zu den einzelnen Ebenen und Liften, wie beispielsweise deren eindeutige Identifizierung oder Verweise auf das jeweilige Objekt, gespeichert.

### **Funktionsmodul Order**

Im Rahmen des Order-Funktionsmoduls werden abhängig von der eingestellten Auftragsstruktur die Aufträge zufallsbasiert erstellt und gespeichert.

### **Funktionsmodul Execution**

Das Funktionsmodul Execution beinhaltet die operative Steuerung. Hier werden die einzelnen Bausteine verknüpft, sodass ein Betrieb des Lagers grundsätzlich ermöglicht wird.

### **Funktionsmodul Control**

Das Funktionsmodul Control umfasst hingegen die strategische Steuerung. Diese regelt die Auftragszuweisung sowie -ausführung und gewährleistet durch die eingesetzten Steuerungsstrategien einen robusten und effizienten Betrieb.

### **Funktionsmodul Evaluation**

Im Evaluation-Funktionsmodul erfolgt die Aufnahme der Messgrößen, Berechnung der Kennzahlen und darauf basierend die Auswertung der Simulationsläufe.



## Funktionsmodul Simulation

Das Simulation-Funktionsmodul definiert die Parametrierung der Simulation, wie die Generierung der Zufallszahlen.

### 5.4.2 Systemkomponenten

Gemäß der Modellierung werden die Systemkomponenten Ebene und Lift in der Simulationsumgebung implementiert.

#### Ebene

Jede Ebene stellt grundsätzlich ein Netzwerk dar und umfasst alle notwendigen Systemkomponenten. Abbildung 5-9 zeigt exemplarisch ein Multi-Server-Shuttle-System mit zehn Ebenen und hebt die Struktur einer Ebene hervor.

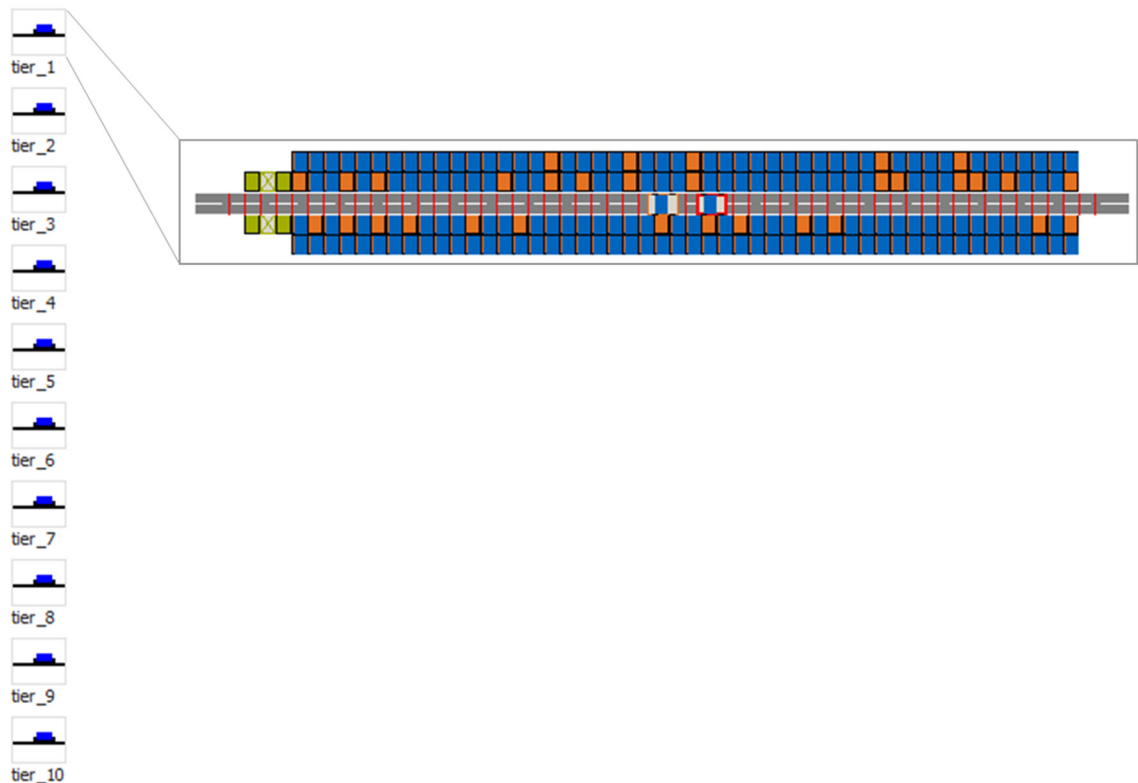


Abbildung 5-9: Simulationsmodell eines Multi-Server-Shuttle-Systems mit zehn Ebenen

#### Lift

Ebenso wird der Lift als Netzwerk umgesetzt, welches die Systemkomponenten eines Behälterlifts umfasst. Abbildung 5-10 stellt beispielhaft ein Multi-Server-Shuttle-System mit zwei Behälterliften dar.

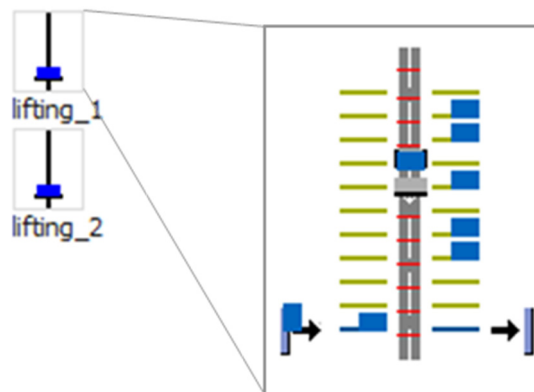


Abbildung 5-10: Simulationsmodell eines Multi-Server-Shuttle-Systems mit zwei Liften

### 5.4.3 Fahrzeugdynamik

Die Bewegungen der Fahrzeuge werden im Simulationsmodell über Sensoren gesteuert. Diese legen fest, an welcher Stelle das Fahrzeug mit  $a_{dec}$  bremsen muss, um den Zielort zu erreichen. Im Falle einer Trapezfahrt lässt sich der Bremsweg wie folgt berechnen:

$$s_{v\max} = \frac{v_{\max}^2}{2 \cdot a_{dec}} \quad (5-4)$$

Bei einer Dreiecksfahrt hingegen kann der Bremsweg folgendermaßen bestimmt werden:

$$s_v = \frac{v^2}{2 \cdot a_{dec}} \quad (5-5)$$

### 5.4.4 Lagerprozesse

Die Durchführung eines TA in der Gasse startet mit der Prüfung des jeweiligen Auftragstyps. Bei einer Einlagerung wird der TA zunächst im Lift aktiviert und einem Lift-Fahrzeug zugewiesen. Nach der Auftragsausführung durch das Lift-Fahrzeug wird der TA in der jeweiligen Ebene aktiviert und wiederum einem Shuttle-Fahrzeug zugewiesen. Sobald der Auftrag durch das Shuttle-Fahrzeug ausgeführt worden ist, ist der TA abgeschlossen.

Bei einer Auslagerung hingegen wird zunächst der TA in der Ebene aktiviert. Es folgt die Zuweisung und Ausführung des Auftrags durch ein Shuttle-Fahrzeug. Danach wird der TA im Lift aktiviert und von einem zugewiesenen Lift-Fahrzeug ausgeführt. Daraufhin ist die Auslagerung abgeschlossen. Der Durchführungsprozess von Ein- und Auslageraufträgen ist in Abbildung 5-11 dargestellt.

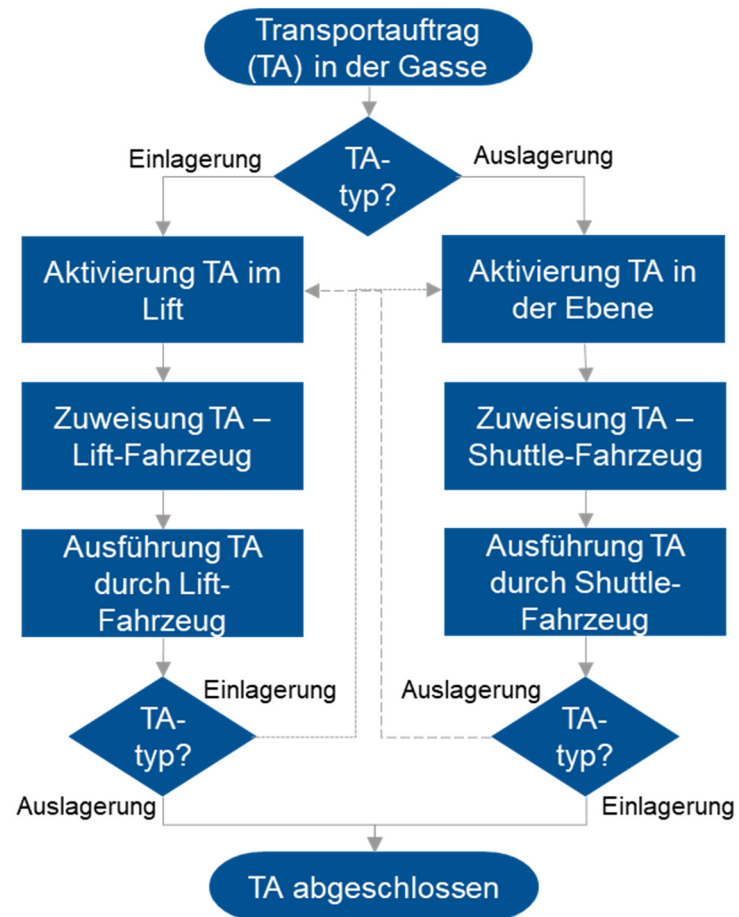


Abbildung 5-11: Auftragsdurchführung in Multi-Server-Shuttle-Systemen



## 6 Durchführung und Auswertung der Parameterstudien

---

Dieses Kapitel umfasst die Parameterstudien zur simulationsbasierten Untersuchung von Multi-Server-Shuttle-Systemen. Es werden zunächst die Ein- und Ausgabeparameter des Simulationsmodells beschrieben, welche im Rahmen der Simulationsstudien variiert und untersucht werden. Daran schließen sich simulationsspezifische Analysen sowie die Überprüfung der Forschungshypothese an. Zuletzt werden die entwickelten Steuerungsstrategien hinsichtlich des erzielbaren Durchsatzes gegenübergestellt.

### 6.1 Definition der Ein- und Ausgabeparameter

Das Simulationsmodell beinhaltet einerseits Einstellgrößen, durch welche sich die im Projekt betrachteten Ausprägungen eines Multi-Server-Shuttle-Systems erstellen lassen. Demnach erfolgt über die Parameter der Gassenlänge und -höhe die Dimensionierung des Lagersystems. Anhand der Ausgestaltung der Lifte sowie deren I/O-Ebenen und kinematischen Parameter der Lift-Fahrzeuge wird der Vertikaltransport konfiguriert. Die kinematischen Parameter der Shuttle-Fahrzeuge spezifizieren die Dynamik des Horizontaltransports in der Ebene. Über die Lagertiefe und den Lagerfüllgrad wird die Anzahl und initiale Befüllung der Lagerfächer in den Ebenen der Gasse festgelegt.

Andererseits wird in den Simulationsläufen eine Vielzahl von Messgrößen aufgenommen, die eine Analyse der Effizienz des Lagersystems ermöglicht. Neben der Durchsatzleistung der Gasse werden die Wartezeiten bzw. Auslastungen, die zurückgelegten Wegstrecken und die Anzahl der durchgeführten Doppelspiele der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge bestimmt. Des Weiteren wird die Änderung des Lagerfüllgrads in den einzelnen Ebenen aufgenommen und es werden die Belegungszeiten der jeweiligen Übergabepuffer zwischen Lift und Ebene erfasst. Außerdem werden die Durchlaufzeiten der einzelnen Aufträge berechnet und die zeitliche Verteilung der ein- und ausgehenden TE bestimmt. Die im Simulationsmodell betrachteten Ein- und Ausgabeparameter zur Erstellung und Auswertung verschiedener Ausprägungen von Multi-Server-Shuttle-Systemen sind in Tabelle 6-1 zusammengestellt und bilden die Basis für die Durchführung der Parameterstudien.

Tabelle 6-1: Betrachtete Eingabe- und Ausgabeparameter des Simulationsmodells

Einstellgrößen (Eingabe)	Messgrößen (Ausgabe)
Länge der Gasse	Durchsatz der Gasse
Höhe der Gasse (Anzahl der Ebenen)	Wartezeiten der Fahrzeuge
Anzahl und Lage der I/O-Ebenen	Auslastung der Fahrzeuge
Anzahl, Position und Betriebsart der Lifte	Lagerfüllgrad der Ebenen
Lagertiefe	Anzahl Doppelspiele der Fahrzeuge
Beschleunigung und Geschwindigkeit der Shuttle-Fahrzeuge	Durchlaufzeiten der Aufträge
Beschleunigung und Geschwindigkeit der Lift-Fahrzeuge	Belegungszeiten der Puffer
Lagerfüllgrad	Wegstrecken der Fahrzeuge
	Zeitliche Verteilung der ein- und ausgehenden Behälter

## 6.2 Simulationsspezifische Untersuchungen

Im Rahmen der Parameterstudien wird jedes Simulationsexperiment mittels drei Beobachtungen durchgeführt. Die Berechnung des Durchsatzes erfolgt nach einer definierten Simulationszeit ohne Ein- und Ausschwingphase. Im Folgenden werden die Untersuchungen zur Simulationszeit sowie zur Ein- und Ausschwingphase beschrieben. Dabei wird eine Gasse eines Multi-Server-Shuttle-Systems mit einer Länge von 50 m und 15 Ebenen betrachtet. An der Stirnseite der Gasse sind zwei Behälterlifte angeordnet, die im Einzelspiel (jeweils Ein- oder Auslagerung) betrieben werden. In den Liften befindet sich die I- bzw. O-Ebene unten. Die Lagerung erfolgt doppeltief mit einem initialen Lagerfüllgrad von 85 %.

### 6.2.1 Untersuchung der Simulationszeit

Zur Bestimmung der notwendigen Dauer eines Simulationsexperiments in den Parameterstudien wird die Änderung der Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der Simulationszeit analysiert und auf den erzielten Durchsatz nach 10 h bezogen (Abbildung 6-1). Es zeigt sich, dass durch die Vorbefüllung des Lagers gemäß dem eingestellten Lagerfüllgrad die Abweichung der Durchsatzleistung bereits bei einer Simulationsdauer von 4 h bei allen betrachteten Fahrzeugpaaren unter 5 % liegt. Dies stellt nach

Abprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses eine hinreichend genaue Ermittlung dar.

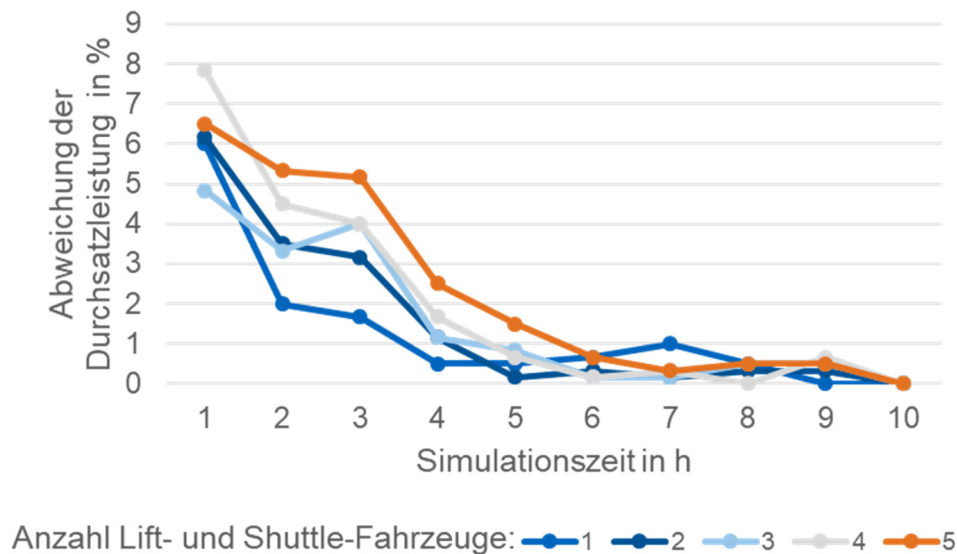


Abbildung 6-1: Abweichung der Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der Simulationszeit und Fahrzeuganzahl (Referenz: 10 h)

### 6.2.2 Untersuchung der Ein- und Ausschwingphase

In den einzelnen Simulationsläufen der Parameterstudien werden die Ein- und Ausschwingphasen herausgerechnet. Hierbei wird die Einschwingphase (Warm-Up) als beendet betrachtet, wenn die Änderung des gleitenden Mittelwerts ( $n=3$ ) der abgeschlossenen Aufträge erstmals unter 10 % beträgt (Abbildung 6-2).

Die Durchsatzberechnung erfolgt über die Anzahl der Aufträge, die innerhalb der definierten Simulationszeit nach der Warm-Up Phase abgeschlossen wurden. Anhand der Anzahl der erstellten Aufträge in der Auftragsliste wird die Auslastung des Lagersystems bis zum Ende der Simulationszeit sichergestellt und somit eine Ausschwingphase verhindert.

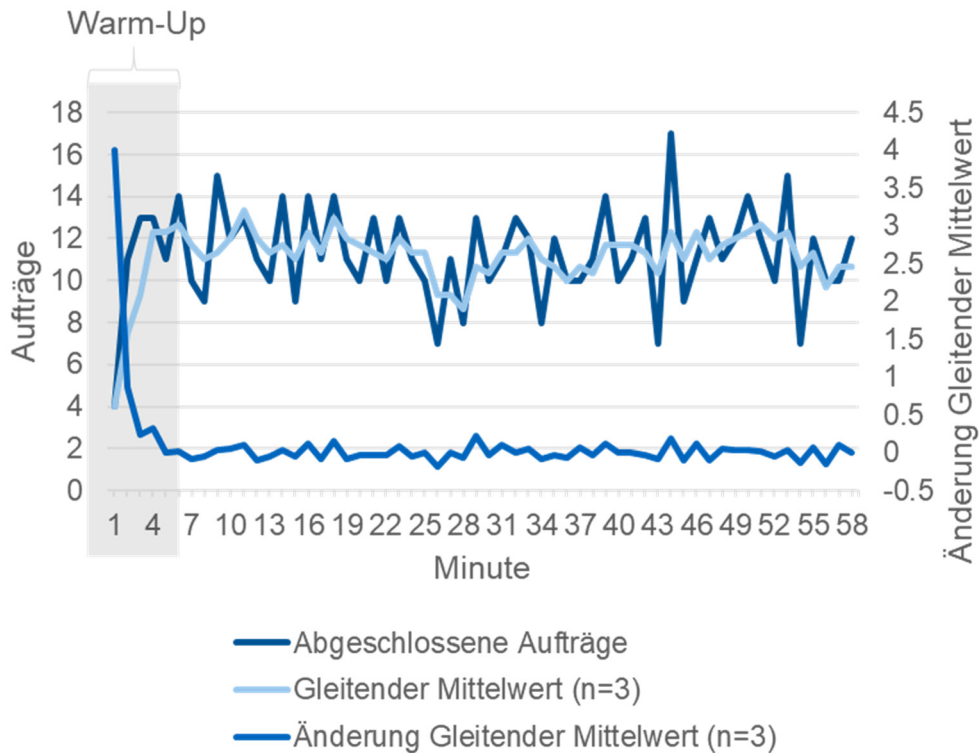


Abbildung 6-2: Identifikation der Warm-Up Phase über die Anzahl abgeschlossener Aufträge je Minute und die Änderung des gleitenden Mittelwerts

## 6.3 Überprüfung der Forschungshypothese

In den folgenden Parameterstudien wird untersucht, ob sich Shuttle-Systeme mit mehr als einem Fahrzeug je Lift und Ebene mit einer geeigneten Layout- und Steuerungskonfiguration effizient und robust betreiben lassen. Neben der Untersuchung der Referenzkonfiguration werden mithilfe eines Experimentdesigns verschiedene Systemkonfigurationen generiert, anhand derer schließlich die Forschungshypothese überprüft wird.

### 6.3.1 Untersuchung der Referenzkonfiguration

Zur Überprüfung der Hypothese wird in Absprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses eine Lagerdimensionierung und -konfiguration gewählt, die in der Praxis üblich ist und damit als Referenz dient. Demnach wird die Gasse eines Shuttle-Systems mit einer Gassenlänge von 50 m und doppeltiefer Lagerung sowie einem Lagerfüllgrad von 85 % untersucht. An der Stirnseite sind zwei Behälterlifte angeordnet, welche im Einzelspielbetrieb arbeiten. Die Lifte besitzen entsprechend der Betriebsart eine I- bzw. O-Ebene auf der untersten Ebene. Die Auftragszuweisung erfolgt funktionsbeschränkt auf Basis von FCFS.



In Abbildung 6-3 ist die Durchsatzleistung der betrachteten Gasse mit einem Lift-Fahrzeug je Lift und einem Shuttle-Fahrzeug je Ebene sowie die mittlere Auslastung der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Gassenhöhe dargestellt. Es zeigt sich, dass der Durchsatz bis 15 Ebenen auf 645 Aufträge je Stunde in der Gasse ansteigt und anschließend wieder abnimmt. Außerdem wird deutlich, dass mit steigender Anzahl der Ebenen in der Gasse die Auslastung der Shuttle-Fahrzeuge sinkt, wohingegen die Auslastung der Lift-Fahrzeuge steigt. Daraus lässt sich ableiten, dass der Durchsatz in einer niedrigen Gasse durch die Shuttle-Fahrzeuge in den Ebenen begrenzt wird, in einer hohen Gasse hingegen die Lift-Fahrzeuge den begrenzenden Faktor darstellen.

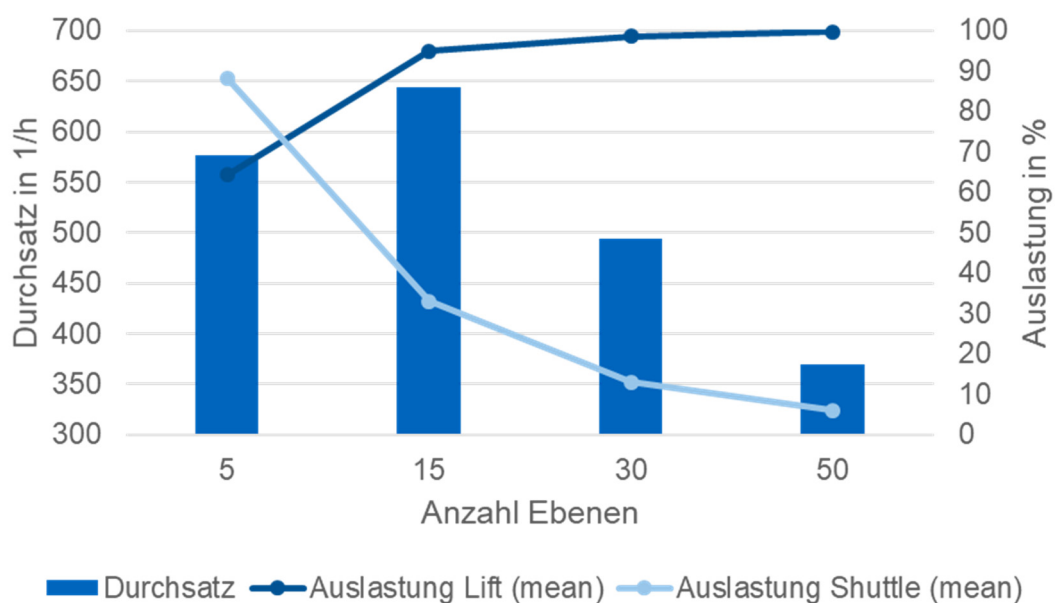


Abbildung 6-3: Durchsatzleistung und Auslastung der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen in der Gasse

Es wird zunächst untersucht, inwiefern der Einsatz von mehreren Shuttle-Fahrzeugen je Ebene den Durchsatz in der betrachteten Gasse beeinflusst. Folglich ist in Abbildung 6-4 die Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen sowie der Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge je Ebene dargestellt. Dabei werden bis zu fünf Shuttle-Fahrzeuge je Ebene eingesetzt. Weiterhin wird lediglich ein Lift-Fahrzeug je Lift betrieben. Die Zuweisung der Aufträge ist unbeschränkt und basiert auf der Prioritätsregel NJ. Die Auftragsausführung wird mithilfe der Blockreservierung sichergestellt.

Es zeigt sich, dass in einer Gasse mit weniger als 15 Ebenen der Durchsatz durch den Einsatz mehrerer Shuttle-Fahrzeuge grundsätzlich erhöht werden kann. Aufgrund der gewählten Ausprägung des Shuttle-Systems ist eine Verschiebung der Durchsatzbegrenzung jedoch nur geringfügig und ausschließlich bei einer niedrigen Gassenhöhe

möglich. Denn durch die geringe Gassenlänge bei gleichzeitig ausschließlicher Aufnahme und Abgabe der TE an der Stirnseite beeinträchtigen sich die Shuttle-Fahrzeuge häufig gegenseitig. In einer Gasse mit zehn Ebenen lässt sich feststellen, dass mit jedem zusätzlichen Shuttle-Fahrzeug in der Ebene eine mittlere Durchsatzsteigerung um lediglich 2 % erzielt werden kann. Die höchste Durchsatzleistung mit 758 Aufträgen je Stunde erbringen in dieser Systemkonfiguration mit zehn Ebenen fünf Shuttle-Fahrzeuge je Ebene. Ab einer Anzahl von 20 Ebenen ist hingegen keine Erhöhung des Durchsatzes durch den Einsatz von mehreren Shuttle-Fahrzeugen je Ebene möglich, da ab dieser Gassenhöhe wiederum das Lift-Fahrzeug der begrenzende Faktor ist.

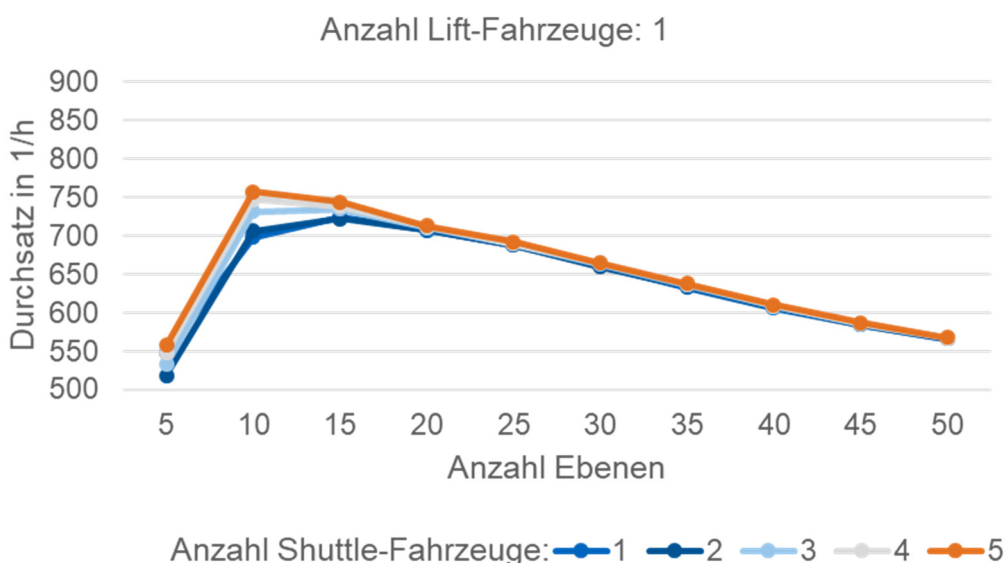


Abbildung 6-4: Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen und Shuttle-Fahrzeuge

Demgegenüber ist in Abbildung 6-5 die Durchsatzleistung der betrachteten Gasse in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen sowie der Anzahl der Lift-Fahrzeuge je Lift dargestellt. Es werden bis zu fünf Lift-Fahrzeuge je Lift und ein Shuttle-Fahrzeug je Ebene eingesetzt. Ebenso erfolgt eine unbeschränkte Auftragszuweisung mittels der Prioritätsregel NJ sowie die Auftragsausführung anhand der Blockreservierung.

Die Kennlinien zeigen auf, dass ab einer Anzahl von zehn Ebenen in der Gasse der Durchsatz durch den Einsatz von mehreren Lift-Fahrzeugen je Lift steigt. Ab 20 Ebenen lässt sich die Durchsatzleistung mit jedem zusätzlichen Lift-Fahrzeug kontinuierlich steigern und mit fünf Lift-Fahrzeugen je Lift bei 843 Aufträgen je Stunde das Maximum erzielen. Damit kann in dieser Systemausprägung insbesondere bei hohen Gassen die Durchsatzbegrenzung nach oben hin deutlich verschoben werden. Des Weiteren stellt sich bei einer Erhöhung auf zwei Lift-Fahrzeuge durchgehend die

größte relative Durchsatzsteigerung ein. So kann bei einer Gasse mit 20 Ebenen mithilfe eines zweiten Lift-Fahrzeugs je Lift der Durchsatz um 12 % angehoben werden.

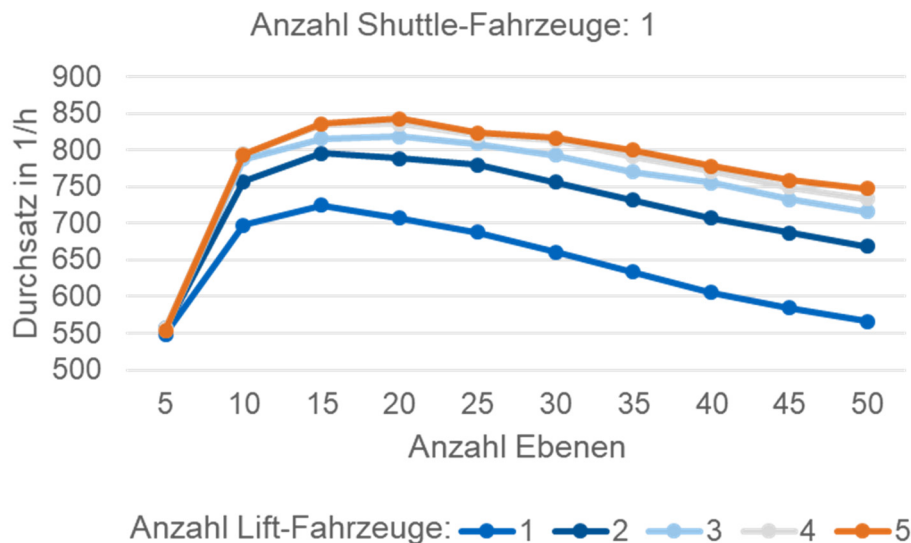


Abbildung 6-5: Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen und Lift-Fahrzeuge

Schließlich wird die Durchsatzleistung der Gasse in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen sowie unter Variation von sowohl Shuttle- als auch Lift-Fahrzeugen analysiert. Dabei werden paarweise bis zu fünf Lift- und Shuttle-Fahrzeuge je Lift und Ebene eingesetzt. Die Auftragszuweisung und -ausführung erfolgt unbeschränkt mithilfe der Prioritätsregel NJ und der Blockreservierung.

Abbildung 6-6 zeigt auf, dass der Einsatz von mehreren Lift- sowie Shuttle-Fahrzeugen je Lift und Ebene den Durchsatz in der Gasse durchgehend ansteigen lässt. Einzig bei einer Anzahl von fünf Ebenen ist eine Durchsatzerhöhung nicht gegeben. Dies ist damit zu begründen, dass in dieser niedrigen Gassenkonfiguration die Shuttle-Fahrzeuge das durchsatzbegrenzende Element darstellen, diese sich allerdings durch die Liftanordnung ausschließlich an der Stirnseite gegenseitig beeinträchtigen. Es lässt sich grundsätzlich feststellen, dass mithilfe von Multi-Server-Systemen in Lift und Ebene die Durchsatzleistung einer Gasse durchaus gesteigert werden kann. Das Durchsatzmaximum von 876 Aufträgen je Stunde wird bei einer Gasse mit 15 Ebenen und jeweils fünf Lift- und Shuttle-Fahrzeugen je Lift und Ebene erreicht. Dies entspricht einer Durchsatzsteigerung von 21 % gegenüber dem Einsatz von jeweils einem Lift- und Shuttle-Fahrzeug.

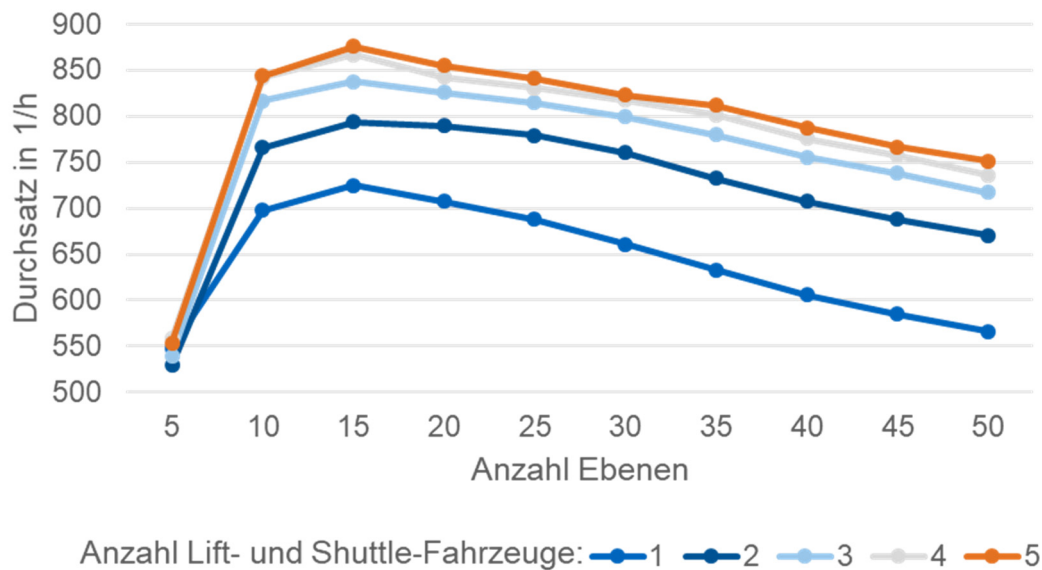


Abbildung 6-6: *Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen und Fahrzeugpaare von Lift- und Shuttle-Fahrzeugen*

### 6.3.2 Versuchsplanung

Zur weiteren Untersuchung der Forschungshypothese werden mithilfe der statistischen Versuchsplanung verschiedene Kombinationen von Dimensionierungen, Systemkonfigurationen und Steuerungsstrategien ermittelt. Auf dieser Basis wird ein Testplan aufgestellt, welcher in den Parameterstudien simuliert wird. Anhand der Simulationsergebnisse aus den Versuchen des Testplans kann schließlich in einer breiten Auswahl an Konfigurationen untersucht werden, in welchen Systemausprägungen der Durchsatz durch den Einsatz von mehreren Lift- und Shuttle-Fahrzeugen im Lift und in der Ebene gesteigert werden kann. Dabei setzen sich die einzelnen Versuche aus Grundkonfigurationen zusammen, die jeweils mit den Einzelkonfigurationen kombiniert werden.

In den Grundkonfigurationen werden die Robustheit und Effizienz der entwickelten Steuerungsstrategien sowie die Auswirkung der Fahrzeuganzahl auf den Durchsatz untersucht. Dementsprechend werden die Steuerungsparameter zur Vergabe, Zuordnung und Ausführung der Aufträge sowie die Anzahl der im Lift und in der Ebene eingesetzten Lift- und Shuttle-Fahrzeuge variiert. So wird bei der Auftragsvergabe zwischen funktions-, orts- und unbeschränkter Vergabe unterschieden. In der Auftragszuordnung werden die entwickelten Prioritätsregeln oder die Blocksequenzierung angewandt und die Ausführung der Aufträge erfolgt mithilfe der Blockreservierung bzw. Abstandsregelung. Die Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge wird jeweils bis zu fünf Fahrzeuge variiert. Ein Auszug aus den betrachteten Grundkonfigurationen ist in Tabelle 6-2 einzusehen.

Tabelle 6-2: Auszug aus den betrachteten Grundkonfigurationen

Auftragsvergabe	Auftragszuordnung	Auftragsausführung	Anzahl Lift-Fahrzeuge	Anzahl Shuttle-Fahrzeuge
Funktionsbeschränkt	-	-	1	1
Ortsbeschränkt	-	-	1	1
Unbeschränkt	Prioritätsregel	Blockreservierung	1	1
Unbeschränkt	Prioritätsregel	Abstandsregelung	1	1
Unbeschränkt	Blocksequenzierung	-	1	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Unbeschränkt	Blocksequenzierung	-	5	5

Die Einzelkonfigurationen stellen die betrachteten Ausprägungen von Shuttle-Systemen dar, in welchen die verschiedenen Steuerungen analysiert werden. Zur Erstellung der Einzelkonfigurationen werden die zu untersuchenden Parameterräume definiert und in Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss die relevanten Parameter ausgewählt sowie deren typische Wertebereiche spezifiziert. Dabei werden die Dimensionen sowie die Ausgestaltung der Gasse (Länge und Höhe der Gasse, Anzahl und Position der Lifte, Lagertiefe und -füllgrad), die Ausgestaltung der Lifte (Anzahl und Lage der I/O-Ebenen, Betriebsart) und die kinematischen Parameter der Fahrzeuge (Geschwindigkeit und Beschleunigung der Lift- bzw. Shuttle-Fahrzeuge) betrachtet. Die Parameter und deren Wertebereiche sind in Tabelle 6-3 zusammengefasst.

Für die systematische Untersuchung der definierten Parameterräume wird ein gleichverteiltes und symmetrisches Testfeld mit 100 Einzelkonfigurationen erstellt. Hierfür wird das Latin Hypercube Verfahren verwendet, welches das Testfeld mit der geringsten Abweichung von einer idealen Verteilung bestimmt. Das Ziel des Verfahrens ist, alle Faktoren bei jedem Versuchslauf auf einen neuen Wert zu testen, sodass kein Wert doppelt geprüft wird. Dabei sind die untersuchten Werte jedes Faktors äquidistant über den Wertebereich verteilt.

Tabelle 6-3: *Betrachtete Parameter und deren Wertebereiche in den Einzelkonfigurationen*

Parameter	Min	Max	Einheit	Kommentar
Gassenlänge	50	150	m	
Anzahl der Ebenen	10	50	-	
Anzahl der I/O-Ebenen	1	3	-	
Lage der I/O-Ebenen	1	3	-	1: unten, 2: mittig, 3: oben
Anzahl der Lifte	1	6	-	
Position der Lifte	1	3	-	1: vorne, 2: mittig, 3: hinten
Betriebsart der Lifte	1	2	-	1: Einzelspiel 2: Doppelspiel
Lagertiefe	1	4	-	
Beschleunigung der Lift-Fahrzeuge	2,5	6	m/s <sup>2</sup>	
Geschwindigkeit der Lift-Fahrzeuge	2	7	m/s	
Beschleunigung der Shuttle-Fahrzeuge	0,5	2	m/s <sup>2</sup>	
Geschwindigkeit der Shuttle-Fahrzeuge	2	4	m/s	
Lagerfüllgrad	0,8	0,95	-	

Auf Basis der erstellten Grund- und Einzelkonfigurationen wird schließlich der Testplan zur Durchführung der Parameterstudien aufgestellt. Die Vorgehensweise für die Testplanerstellung und ein Auszug aus dem Testplan ist in Abbildung 6-7 zusammenfassend dargestellt.

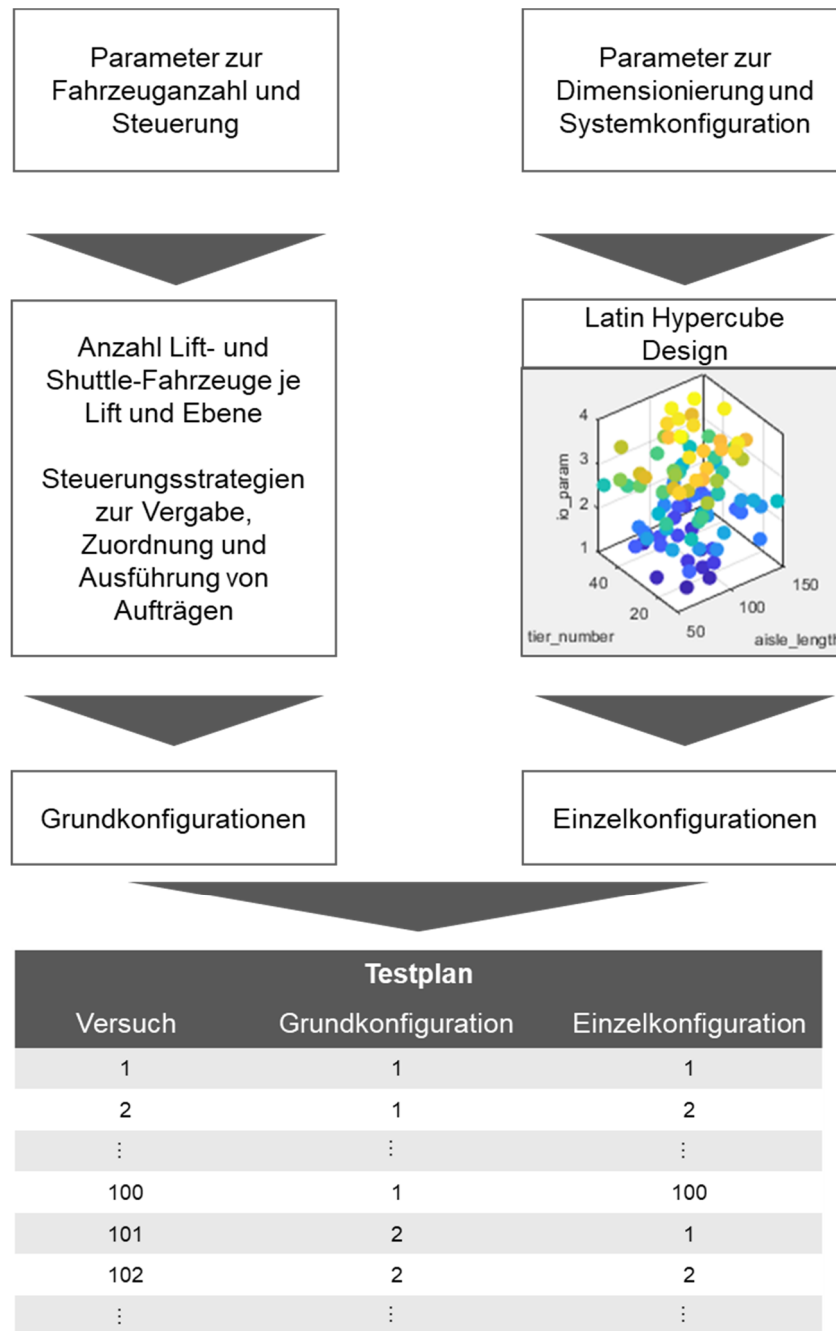


Abbildung 6-7: Vorgehensweise zur Erstellung des Testplans

### 6.3.3 Auswertung

Die im Rahmen der Versuchsplanung generierten Konfigurationen stellen die Ausprägungen von Shuttle-Systemen dar, welche hinsichtlich des Durchsatzes simulativ untersucht werden. Demnach zeigt Abbildung 6-8 exemplarisch die Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der jeweiligen Konfiguration. So werden auszugswise 30 Systemausprägungen und jeweils ein bis drei Shuttle- (S) bzw. Lift-Fahrzeuge (L) beispielhaft betrachtet. Die angewandte Steuerungsstrategie entspricht einer unbeschränkten Vergabe mit der Prioritätsregel NJ für die Zuweisung sowie mit der Blockreservierung

für die Ausführung der Aufträge. Zur Überprüfung der Forschungshypothese wird insbesondere zwischen Systemen mit jeweils einem Shuttle-Fahrzeug je Ebene sowie einem Lift-Fahrzeug je Lift (Single-Server-System) und Systemen mit mehreren Shuttle- und Lift-Fahrzeugen je Ebene und Lift (Multi-Server-Systeme) unterschieden.

Demnach zeigt sich, dass die Durchsatzleistung der Single-Server-Systeme innerhalb der jeweiligen Konfiguration fast durchgehend am niedrigsten ausfällt. Lediglich in Konfiguration 27 ist aufgrund einer geringen Gassenhöhe und der damit verbundenen gegenseitigen Beeinträchtigung der Lift-Fahrzeuge die Durchsatzleistung in einem Multi-Server-System (S3L3) geringer als in einem Single-Server-System (S1L1). Des Weiteren wirkt sich der Einsatz von zwei bzw. drei Shuttle-Fahrzeugen mit einem Lift-Fahrzeug (S2L1 bzw. S3L1) kaum auf den Durchsatz aus und ist vergleichbar mit dem Einsatz von einem Shuttle- und Lift-Fahrzeug (S1L1). Grundsätzlich sind jedoch die Leistungsunterschiede zwischen den Single- und Multi-Server-Systemen stark abhängig von der jeweiligen Konfiguration.

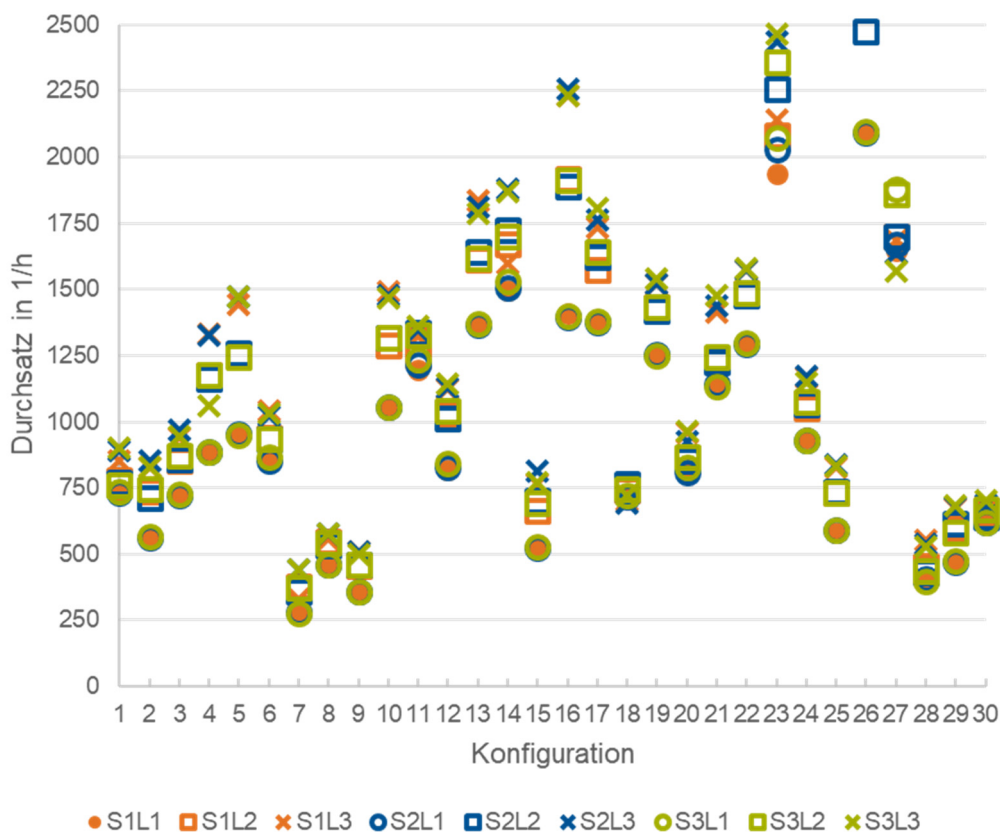


Abbildung 6-8: Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der Konfiguration und Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge

In Abbildung 6-9 ist auf Basis der betrachteten Konfigurationen die durchschnittliche Änderung der Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der Anzahl der eingesetzten Lift-



und Shuttle-Fahrzeuge im Lift und in der Ebene dargestellt. Es zeigt sich, dass eine Erhöhung der Anzahl der Lift-Fahrzeuge eine Steigerung der Durchsatzleistung zur Folge hat. So wird unabhängig von der Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge eine mittlere Leistungssteigerung von 18 % durch den Einsatz eines zweiten Lift-Fahrzeugs je Lift erzielt. Der Einsatz eines dritten Lift-Fahrzeugs je Lift erhöht die Durchsatzleistung mindestens um weitere 10 %. Die Erhöhung der Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge je Ebene hat im Durchschnitt allerdings kaum eine Steigerung der erzielbaren Durchsatzleistung zur Folge.

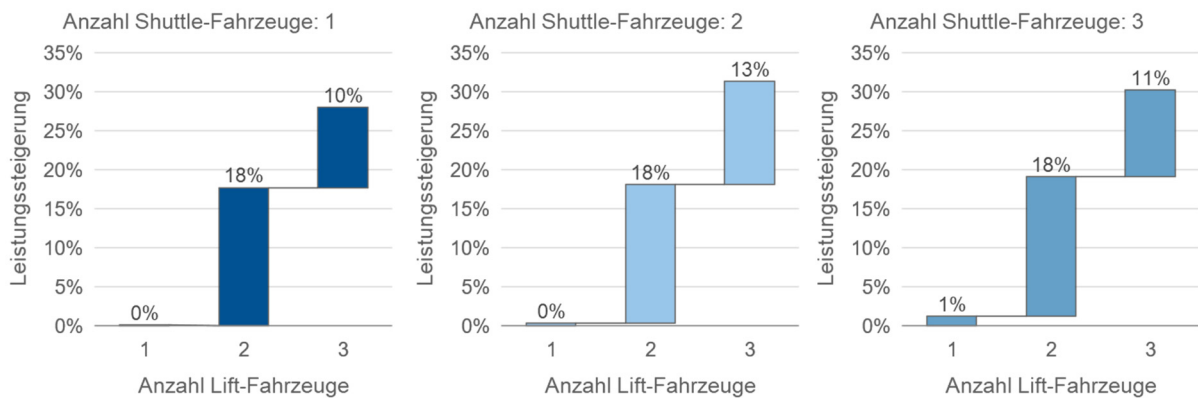


Abbildung 6-9: Durchschnittliche Leistungssteigerung in den betrachteten Konfigurationen in Abhängigkeit von der Anzahl der eingesetzten Lift- und Shuttle-Fahrzeuge (Referenz: Durchsatz des Single-Server-Systems)

## 6.4 Vergleich der Steuerungsstrategien

In den folgenden Simulationsstudien werden die Steuerungsstrategien zur Vergabe, Zuordnung und Ausführung von Aufträgen an die Lift- und Shuttle-Fahrzeuge untersucht und verglichen. Hierbei werden insbesondere die Durchsatzleistungen in verschiedenen Ausprägungen von Multi-Server-Shuttle-Systemen herangezogen. Auf diese Weise werden die Zusammenhänge zwischen den Freiheitsgraden zur Dimensionierung, Konfiguration sowie Steuerung und dem erzielbaren Durchsatz verdeutlicht. Die Werte für die kinematischen Parameter der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge zum Vergleich der Steuerungsstrategien bleiben unverändert und sind in Tabelle 6-4 aufgeführt.

Tabelle 6-4: Kinematische Parameter der Fahrzeuge zum Vergleich der Steuerungsstrategien

Parameter	Wert
Beschleunigung der Lift-Fahrzeuge in $m/s^2$	2,5
Geschwindigkeit der Lift-Fahrzeuge in $m/s$	2
Beschleunigung der Shuttle-Fahrzeuge in $m/s^2$	2
Geschwindigkeit der Shuttle-Fahrzeuge in $m/s$	2

### 6.4.1 Vergleich der Vergabestrategien

Zunächst werden in Abbildung 6-10 die Durchsatzleistungen der verschiedenen Strategien zur Auftragsvergabe in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge gegenübergestellt. Hierfür wird eine Systemausprägung untersucht, deren Parameterwerte in Tabelle 6-5 aufgelistet sind.

Tabelle 6-5: Parameterwerte der Systemausprägung zum Vergleich der Vergabestrategien

Parameter	Wert
Gassenlänge in m	50
Anzahl der Ebenen	15
Anzahl der I/O-Ebenen	1
Lage der I/O-Ebenen	unten
Anzahl der Lifte	2
Position der Lifte	vorne
Betriebsart der Lifte	Einzelspiel
Lagertiefe	1
Lagerfüllgrad	0,85

Grundsätzlich erzielt die unbeschränkte Vergabe in Verbindung mit der Prioritätsregel NJ in sämtlichen Fahrzeugkonstellationen den größten Durchsatz. Insbesondere durch Erhöhung der Anzahl der Lift-Fahrzeuge lässt sich der Durchsatz kontinuierlich steigern. Innerhalb der ortsbeschränkten Vergabe ist beim Einsatz eines zweiten Lift-Fahrzeugs zunächst eine Verringerung des Durchsatzes erkennbar. Dies lässt sich auf

die Übergabezeiten an den Transferpuffern bei zonenübergreifenden Transporten zurückführen. Ab dem Einsatz von drei Lift-Fahrzeugen je Lift steigt der Durchsatz geringfügig an. Aufgrund der ausschließlich vorne positionierten Lifte in Verbindung mit einer I/O-Ebene ist die funktionsbeschränkte Vergabe in dieser Systemausprägung lediglich als Single-Server-System anwendbar und dient zur Validierung des Modells. Dementsprechend ist im Single-Server-System der Durchsatz von funktions- und ortsbeschränkter Vergabe äquivalent. Bei unbeschränkter Vergabe kommt mit der Prioritätsregel NJ allerdings bereits eine effiziente Auftragszuordnung zum Einsatz, sodass der Durchsatz höher ausfällt.

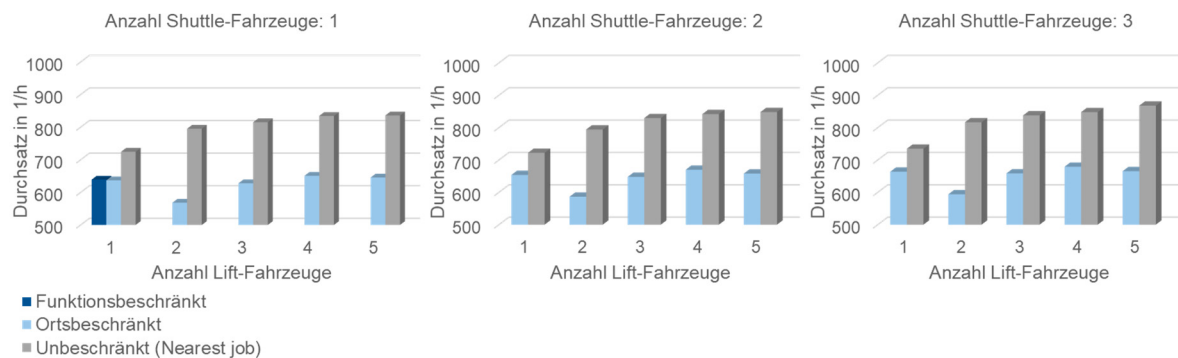


Abbildung 6-10: Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der Vergabestrategie und Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge

In Abbildung 6-11 ist die Durchsatzleistung der funktionsbeschränkten Vergabe in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen sowie der Länge der Gasse dargestellt. Die Parameterwerte der Systemausprägung können Tabelle 6-6 entnommen werden.

Tabelle 6-6: Parameterwerte der Systemausprägung zur Untersuchung der funktionsbeschränkten Vergabestrategie

Parameter	Wert
Anzahl der I/O-Ebenen	2
Lage der I/O-Ebenen	unten, mittig
Anzahl der Lifte	4
Position der Lifte	vorne, hinten
Betriebsart der Lifte	Einzelspiel
Lagertiefe	1
Lagerfüllgrad	0,85

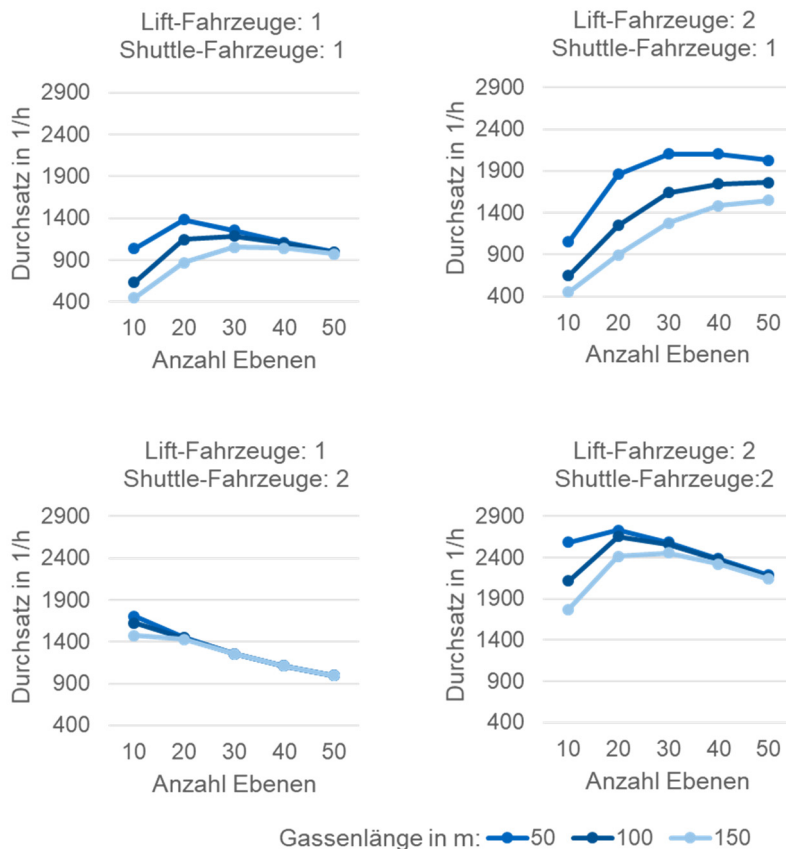


Abbildung 6-11: Durchsatzleistung der funktionsbeschränkten Vergabestrategie in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen sowie der Länge der Gasse

Die Kennlinien zeigen auf, dass ein zweites Lift-Fahrzeug je Lift den Durchsatz insbesondere bei hohen Gassen erhöht. Zwei Shuttle-Fahrzeuge je Ebene steigern hingegen den Durchsatz bei niedrigen Gassen. Zudem kann der Einsatz eines zweiten Shuttle-Fahrzeugs die Durchsatzverringerung infolge einer langen Gasse deutlich reduzieren. Mit dem Einsatz von zwei Lift- und Shuttle-Fahrzeugen lässt sich die Durchsatzleistung über sämtliche Gassenlängen und -höhen deutlich steigern.

Abbildung 6-12 zeigt die Durchsatzleistung der ortsbeschränkten Vergabe in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge in verschiedenen Gassenlängen. Die Parameterwerte der betrachteten Systemausprägung sind in Tabelle 6-7 aufgeführt.

Tabelle 6-7: Parameterwerte der Systemausprägung zur Untersuchung der ortsbeschränkten Vergabestrategie

Parameter	Wert
Anzahl der Ebenen	15
Anzahl der I/O-Ebenen	1
Lage der I/O-Ebenen	unten
Anzahl der Lifte	2
Position der Lifte	vorne
Betriebsart der Lifte	Einzelspiel
Lagertiefe	1
Lagerfüllgrad	0,85

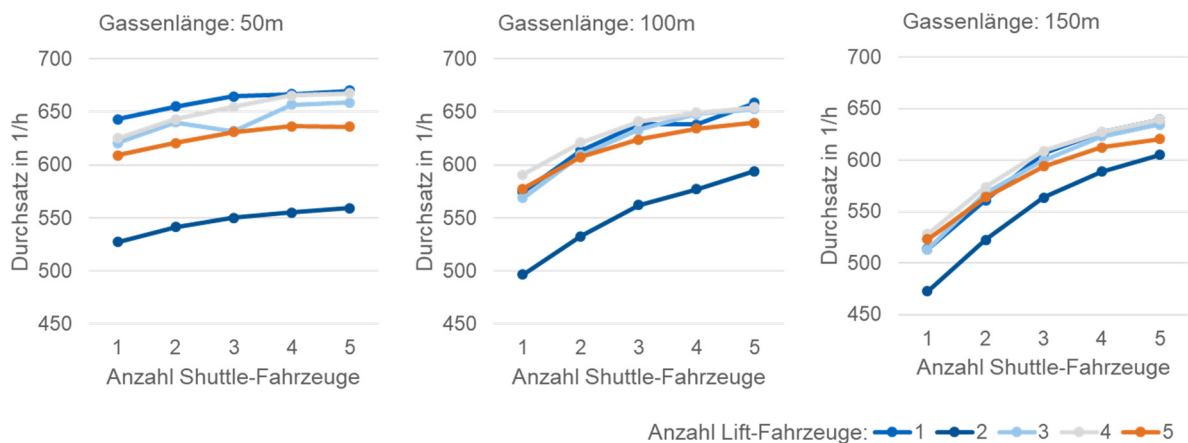


Abbildung 6-12: Durchsatzleistung der ortsbeschränkten Vergabestrategie in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge

Insbesondere bei langen Gassen kann der Einsatz von mehreren Shuttle-Fahrzeugen in der Ebene den Durchsatz deutlich anheben. Der Einsatz von mehreren Lift-Fahrzeugen im Lift wirkt sich dagegen weniger stark auf die Durchsatzleistung aus. Der Einsatz von zwei Lift-Fahrzeugen je Lift weist aufgrund der erhöhten Transportzeiten durch die Übergaben an den Transferpuffern durchgehend die niedrigsten Durchsätze auf. Ab dem Einsatz von drei Lift-Fahrzeugen werden die Übergabezeiten jedoch nahezu ausgeglichen.

Abbildung 6-13 zeigt die Durchsatzleistung der unbeschränkten Vergabe in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge und unter Anwendung der fahrzeugbasierten Prioritätsregeln RJ, FCFS und NJ für die Auftragszuordnung an die Shuttle- und Lift-Fahrzeuge. Die Parameterwerte der Systemausprägung sind Tabelle 6-8 zu entnehmen.

Tabelle 6-8: Parameterwerte der Systemausprägung zur Untersuchung der unbeschränkten Vergabestrategie und Prioritätsregeln

Parameter	Wert
Gassenlänge in m	50
Anzahl der Ebenen	15
Anzahl der I/O-Ebenen	1
Lage der I/O-Ebenen	unten
Anzahl der Lifte	2
Position der Lifte	vorne
Betriebsart der Lifte	Einzelspiel
Lagertiefe	1
Lagerfüllgrad	0,85

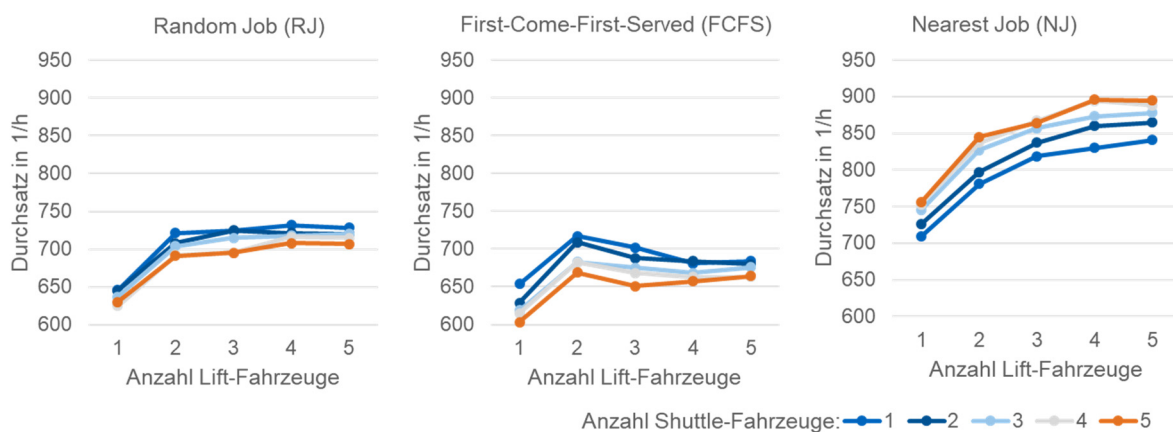


Abbildung 6-13: Durchsatzleistung der unbeschränkten Vergabestrategie mit fahrzeugbasierten Prioritätsregeln in Abhängigkeit von der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge

Unter Anwendung der Prioritätsregeln RJ und FCFS kann der Durchsatz lediglich bei zwei Lift-Fahrzeugen erkennbar gesteigert werden. Weitere Lift-Fahrzeuge lassen den

Durchsatz nur geringfügig ansteigen oder wieder verringern. Mit steigender Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge lässt sich sogar eine Verringerung der Durchsatzleistung feststellen. Dies kann dadurch begründet werden, dass die beiden Prioritätsregeln keine Optimierung der Auftragszuweisung bewirken und somit die gegenseitige Beeinträchtigung der einzelnen Fahrzeuge ausschlaggebend ist. Mittels der Prioritätsregel NJ kann hingegen durch die effiziente Zuweisung der Aufträge der Durchsatz mit steigender Anzahl an Lift- und Shuttle-Fahrzeugen kontinuierlich erhöht werden. Demnach weist innerhalb der fahrzeugbasierten Prioritätsregeln die Regel NJ die höchste Durchsatzleistung auf.

In Abbildung 6-14 ist die Durchsatzleistung der unbeschränkten Vergabe in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge und unter Anwendung der auftragsbasierten Prioritätsregeln RV, LUV, LIV und DCP dargestellt. Die Parameterwerte der untersuchten Systemausprägung sind in Tabelle 6-8 aufgelistet.

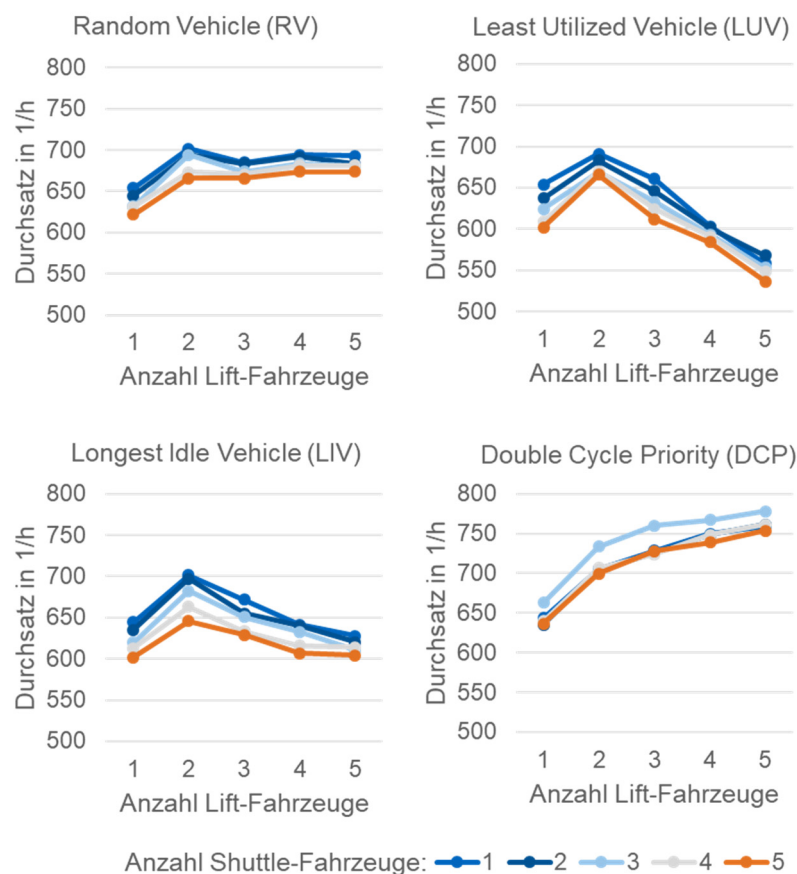


Abbildung 6-14: Durchsatzleistung der unbeschränkten Vergabestrategie mit auftragsbasierten Prioritätsregeln in Abhängigkeit von der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge

Die Durchsatz-Kennlinien zeigen, dass in den Prioritätsregeln RV, LUV und LIV ausschließlich der Einsatz eines zweiten Lift-Fahrzeugs den Durchsatz erhöht. Weitere

Lift-Fahrzeuge sowie mehrere Shuttle-Fahrzeuge verringern den Durchsatz. Daraus lässt sich ableiten, dass eine alleinige Optimierung der Fahrzeugauslastung keine Durchsatzsteigerung erbringt. Die Prioritätsregel DCP hingegen erzielt mit steigender Anzahl der Lift-Fahrzeuge eine kontinuierliche Erhöhung des Durchsatzes. Mehrere Shuttle-Fahrzeuge haben allerdings keine Durchsatzsteigerung in der Systemausprägung zur Folge. In den hier betrachteten Prioritätsregeln weist die Regel DCP somit die höchste Durchsatzleistung auf.

Abbildung 6-15 stellt die Durchsatzleistung der unbeschränkten Vergabe in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge und unter Anwendung der auftragsbasierten Prioritätsregeln NV, NVTM und NVIP dar. Die Parameterwerte der Ausprägung sind in Tabelle 6-8 aufgeführt.

Während die Prioritätsregel NV keine merkliche Durchsatzerhöhung bzw. -änderung aufweist, kann unter Anwendung der Regel NVTM durch den Einsatz von mehreren Shuttle- sowie Lift-Fahrzeugen der Durchsatz gesteigert werden. Insbesondere durch die Regel NVIP lässt sich die Durchsatzleistung deutlich erhöhen. Demzufolge weist unter den auftragsbasierten Prioritätsregeln die Regel NVIP die höchste Durchsatzleistung auf.

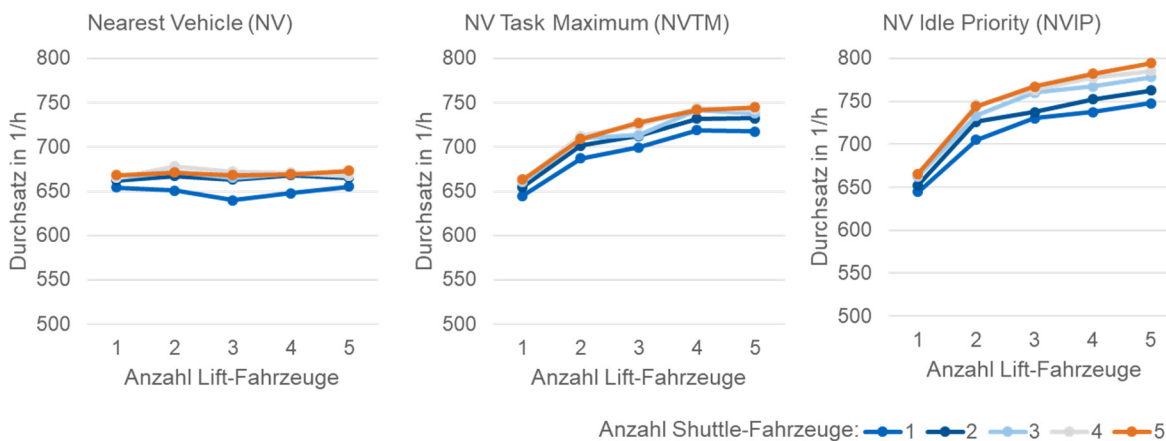


Abbildung 6-15: Durchsatzleistung der unbeschränkten Vergabestrategie mit auftragsbasierten Prioritätsregeln (NV) in Abhängigkeit von der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge

### 6.4.2 Vergleich der Zuordnungsstrategien

Abbildung 6-16 stellt die Durchsatzleistungen der sukzessiven und simultanen Zuordnung von Aufträgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge gegenüber. Die sukzessive Auftragszuordnung erfolgt auf Basis der Prioritätsregel NJ und ist mithilfe der Blockreservierung ausgeführt. Die simultane Zuordnung ist mittels der Blocksequenzierung realisiert. Die Parameterwerte der Ausprägung sind Tabelle 6-8 zu entnehmen.



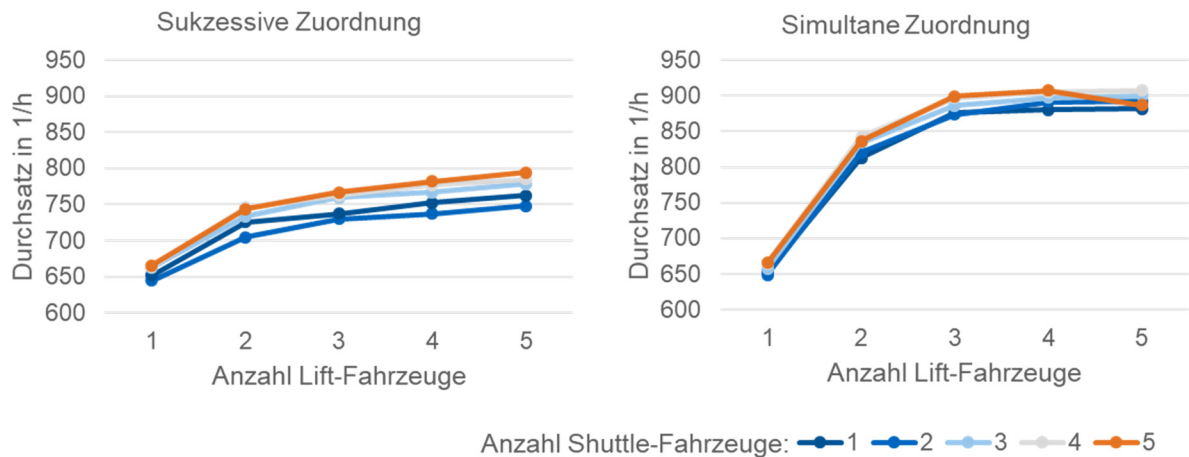


Abbildung 6-16: Durchsatzleistung der Zuordnungsstrategien in Abhängigkeit von der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge

In beiden Zuordnungsstrategien kann grundsätzlich durch die Erhöhung der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge in Lift und Ebene der Durchsatz gesteigert werden. Während innerhalb der sukzessiven Zuordnung der Durchsatz langsam aber stetig steigt, erreicht der Durchsatz in der simultanen Zuordnung nach einem starken Anstieg eine Sättigung bei dem Einsatz von drei Lift-Fahrzeugen je Lift, welche auf die betrachtete Systemausprägung zurückzuführen ist. Die Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge je Ebene beeinflusst jedoch in beiden Strategien den Durchsatz wesentlich geringer als die Anzahl der eingesetzten Lift-Fahrzeuge. Insgesamt lässt sich allerdings mithilfe der simultanen Zuordnung eine deutlich höhere Durchsatzleistung erzielen.

### 6.4.3 Vergleich der Ausführungsstrategien

Abbildung 6-17 stellt die Durchsatzleistungen der Strategien zur Ausführung von Aufträgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge gegenüber. Die Auftragszuordnung erfolgt mithilfe der Prioritätsregel NVIP. Die Parameterwerte der Ausprägung können Tabelle 6-8 entnommen werden.

Beide Ausführungsstrategien erreichen durch den Einsatz von mehreren Lift- und Shuttle-Fahrzeugen eine Erhöhung der Durchsatzleistung. Ebenso wirkt sich der Einsatz von mehreren Lift-Fahrzeugen stärker als der Einsatz von mehreren Shuttle-Fahrzeugen auf die erzielbaren Durchsätze aus. Gegenüber der Blockreservierung lassen sich mit der Abstandsregelung allerdings deutlich höhere Durchsätze erzielen. Grund hierfür ist die optimierte Ausführung, da in der Abstandsregelung stets das Fahrzeug mit der kürzeren Wegstrecke zum Zielort die Priorität erhält. In der Blockreservierung hingegen wird das Fahrzeug mit dem ältesten Auftrag priorisiert.

Zudem lässt sich feststellen, dass unter Anwendung der Abstandsregelung zur Auftragsausführung die höchsten Durchsätze innerhalb der untersuchten Steuerungsstrategien der unbeschränkten Auftragsvergabe und in der betrachteten Konfiguration erzielt werden können.

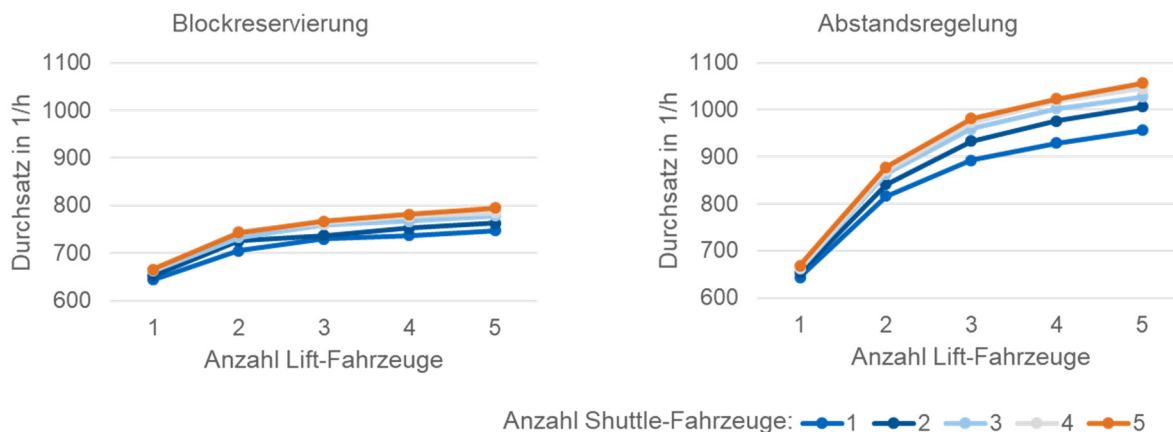


Abbildung 6-17: Durchsatzleistung der Ausführungsstrategien in Abhängigkeit von der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge

## 6.5 Ergebnisdiskussion

Die Ergebnisse der Parameterstudien zeigen auf, dass mithilfe der entwickelten Steuerungsstrategien Multi-Server-Shuttle-Systeme robust gesteuert werden können. Gegenüber Single-Server-Shuttle-Systemen stellt sich bei den Systemen mit mehr als einem Fahrzeug pro Lift und Ebene in den meisten Fällen ein Durchsatzgewinn ein. Allerdings wird die Erhöhung des Durchsatzes erheblich von der Anwendbarkeit und Effizienz der Betriebsstrategien beeinflusst. So ist die funktionsbeschränkte Vergabe von Aufträgen nur in entsprechend geeigneten Systemkonfigurationen mit mehreren Funktionsbereichen einsetzbar (vgl. Abbildung 6-10). Falls die Anwendung dieser Auftragsvergabe jedoch möglich ist, kann durch den Einsatz von mehreren Lift- und Shuttle-Fahrzeugen je Lift und Ebene eine deutliche Steigerung der Durchsatzleistung erzielt werden (vgl. Abbildung 6-11). Die ortsbeschränkte Auftragsvergabe lässt sich hingegen in sämtlichen Systemkonfigurationen einsetzen, die Durchsatzerhöhung fällt in dieser Betriebsstrategie allerdings wesentlich geringer aus (vgl. Abbildung 6-12). Die unbeschränkte Auftragsvergabe bietet schließlich die Möglichkeit zur umfassenden Anwendung von Prioritätsregeln und erlaubt damit die Optimierung der Auftragsdurchführung. Die Untersuchung der verschiedenen Prioritätsregeln hat gezeigt, dass deren Effizienz stark variiert und die fahrzeugbasierte Regel zur Wegstreckenoptimierung (NJ) die höchste Durchsatzleistung erbringt (vgl. Abbildung 6-13). Innerhalb der auftragsbasierten Regeln können mithilfe einer Kombination aus Wegstrecken-

und Auslastungsoptimierung (NVIP) die höchsten Durchsätze erzielt werden (vgl. Abbildung 6-15).

Für die Anwendung von Prioritätsregeln erfolgt eine sukzessive Zuordnung der Aufträge an die Lift- und Shuttle-Fahrzeuge. Demgegenüber steht eine simultane Auftragszuordnung, welche stets Auftragsblöcke an die Fahrzeuge übergibt und damit die Auftragsdurchführung blockweise optimieren kann. Daraus resultiert wiederum eine höhere Durchsatzleistung gegenüber der sukzessiven Zuordnung (vgl. Abbildung 6-16). Ein Nachteil dieser Auftragszuordnungsstrategie ist jedoch die erhöhte Komplexität durch die Berechnung der Raum-Zeit-Trajektorien und die Optimierung der Auftragsplanung.

Zuletzt wird die erzielbare Durchsatzleistung auch durch die angewandte Strategie zur Auftragsausführung beeinflusst. Im Rahmen der Simulationsstudien hat sich gezeigt, dass unter Anwendung der Abstandsregelung durchgehend die höchsten Durchsätze erreicht werden (vgl. Abbildung 6-17). Dies lässt sich darauf zurückführen, dass in dieser Strategie bei der Auflösung von Blockaden eine Priorisierung auf Basis der Wegstrecke erfolgt und damit eine zusätzliche Optimierung der Auftragsdurchführung erfolgt.

Außerdem hängt der jeweilige Anstieg der Durchsatzleistung stark von der betrachteten Lagerdimension und -konfiguration ab. Denn insbesondere in langen und hohen Gassen treten beim Einsatz von mehreren Shuttle- und Lift-Fahrzeugen weniger Begegnungen auf. Damit geht schließlich eine geringere Anzahl von gegenseitigen Beeinträchtigungen und in weiterer Konsequenz eine Erhöhung der Durchsatzleistung einher. Die Anzahl der Lifte und I/O-Ebenen wiederum bestimmt die Anzahl der Aufnahme- und Abgabemöglichkeiten für die Shuttle- und Lift-Fahrzeuge, sodass dies ebenso die Durchsatzleistung beeinflusst.



## 7 Ableitung von Handlungsempfehlungen

---

Basierend auf den Ergebnissen der Parameterstudien werden in diesem Kapitel Handlungsempfehlungen abgeleitet, die zur Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen herangezogen werden können. Es wird zunächst die Vorgehensweise zur Konfiguration beschrieben, anhand welcher die einzelnen Schritte bis zur Bestimmung der durchsatzoptimalen Anzahl der einzusetzenden Lift- und Shuttle-Fahrzeuge erläutert werden. Dabei wird insbesondere die Durchsatzänderung in Abhängigkeit von den Lagerdimensionen sowie die Leistungssteigerung in Abhängigkeit von der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge exemplarisch analysiert. Abschließend erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse zur Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen.

### 7.1 Vorgehensweise zur Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen

Für die Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen gilt es zuerst die Einflussfaktoren aufzunehmen. Diese sind die benötigte Anzahl der Lagerfächer, die geforderte Durchsatzleistung sowie Randbedingungen, die gegeben sind und beachtet werden müssen. Auf dieser Grundlage wird eine Konfiguration gewählt, welche unter den Randbedingungen die benötigte Anzahl der Lagerfächer sicherstellt (z. B. Lagertiefe) sowie die geforderte Durchsatzleistung erbringt (z. B. Anzahl der Lifte). Außerdem wird eine Steuerung bestimmt, welche in der betrachteten Konfiguration einen robusten und effizienten Betrieb ermöglicht (z. B. Strategie zur Auftragsvergabe). Anschließend kann in der definierten Konfiguration und Steuerung mithilfe von Simulationsstudien die Durchsatzänderung unter Variation der Gassenlänge und -höhe untersucht werden, um die Dimension des zu konfigurierenden Multi-Server-Shuttle-Systems festzulegen. Schließlich kann innerhalb der bestimmten Konfiguration, Steuerung und Dimension die Leistungssteigerung unter Variation der Anzahl der Lift-Fahrzeuge je Lift und der Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge je Ebene simulativ untersucht werden. Daraufhin lässt sich abschließend eine geeignete Fahrzeuganzahl in Lift und Ebene ermitteln und die durchsatzoptimale Konfiguration identifizieren. In Abbildung 7-1 ist die Vorgehensweise zur Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen zusammenfassend dargestellt.

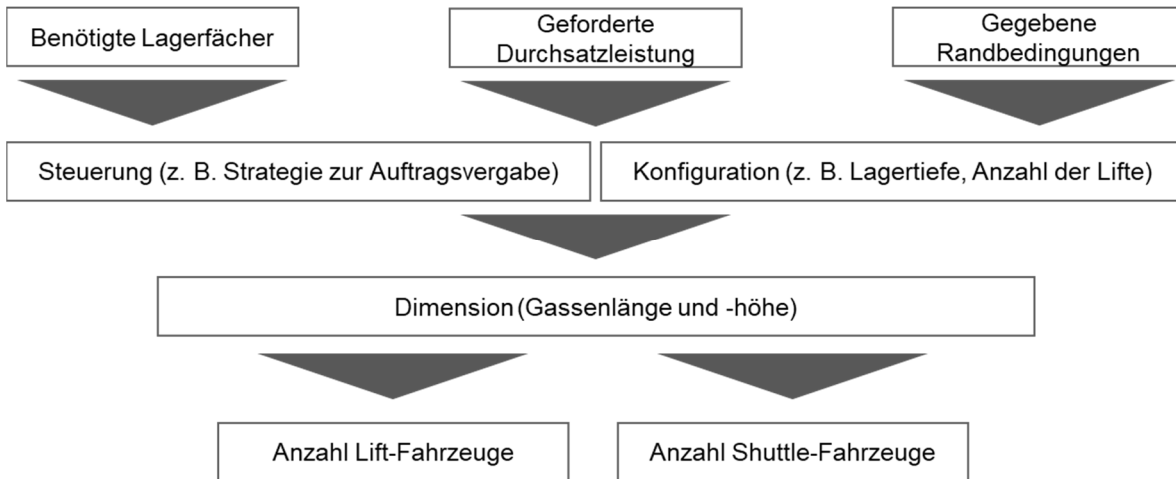


Abbildung 7-1: Vorgehensweise zur Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen

## 7.2 Untersuchung der Durchsatzänderung unter Variation der Dimensionen

Die simulative Untersuchung der Durchsatzänderung in Abhängigkeit von den Lagerdimensionen wird anhand einer exemplarischen Konfiguration (Tabelle 7-1) und verschiedener Steuerungen demonstriert. Dabei werden einerseits die Gassenlänge und die Anzahl der Ebenen variiert, andererseits wird die Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge verändert.

Tabelle 7-1: Parameterwerte der Konfiguration zur Untersuchung der Durchsatzänderung unter Variation der Dimensionen

Parameter	Wert
Anzahl der I/O-Ebenen	1
Lage der I/O-Ebenen	unten
Anzahl der Lifte	2
Position der Lifte	vorne
Betriebsart der Lifte	Einzelspiel
Lagertiefe	2
Lagerfüllgrad	0,85

Abbildung 7-2 zeigt die Durchsatz-Kennlinien in der betrachteten Konfiguration und unter Anwendung der unbeschränkten Auftragsvergabe mit der Prioritätsregel NJ sowie der Blockreservierungsstrategie für die Ausführung der Aufträge. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass sich die Gassenlänge insbesondere bei einer geringen Anzahl von Ebenen auf den Durchsatz auswirkt. Eine Erhöhung der Anzahl an Lift-Fahrzeugen zieht eine Durchsatzsteigerung vor allem bei höheren Gassen nach sich. Der Einsatz von weiteren Shuttle-Fahrzeugen erbringt nur in Kombination mit mehreren Lift-Fahrzeugen eine geringfügige Durchsatzsteigerung.

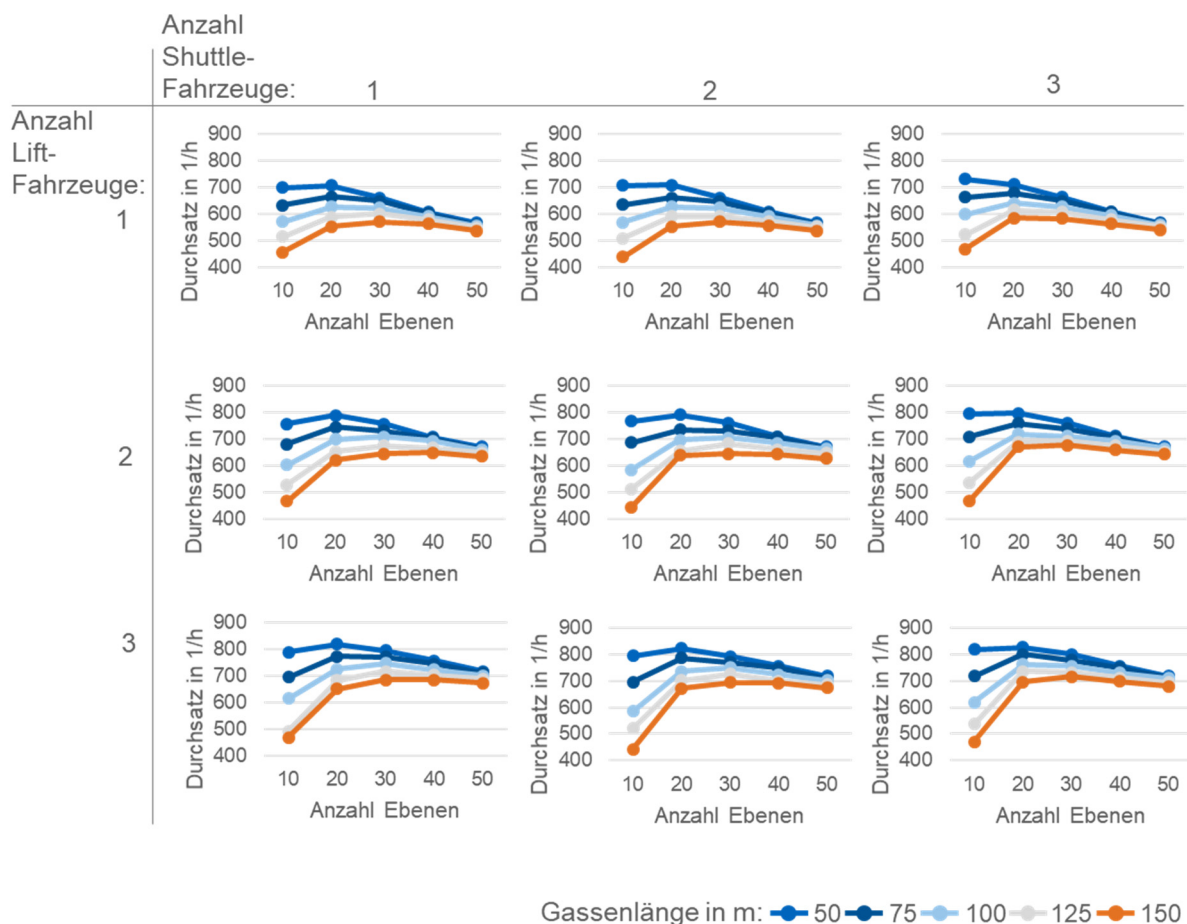


Abbildung 7-2: Durchsatzänderung unter Variation der Lagerdimensionen und Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge bei Anwendung der unbeschränkten Auftragsvergabe (Prioritätsregel NJ) und der Blockreservierung für die Auftragsausführung

In Abbildung 7-3 sind die Durchsatz-Kennlinien bei Anwendung der unbeschränkten Auftragsvergabe (Prioritätsregel NJ) und der Abstandsregelung für die Auftragsausführung dargestellt. Daraus zeigt sich, dass die Erhöhung der Anzahl an Lift-Fahrzeugen den Durchsatz deutlich ansteigen lässt. Die Erhöhung der Anzahl an Shuttle-Fahrzeugen steigert die Durchsätze vor allem bei einer niedrigen Anzahl an Ebenen.

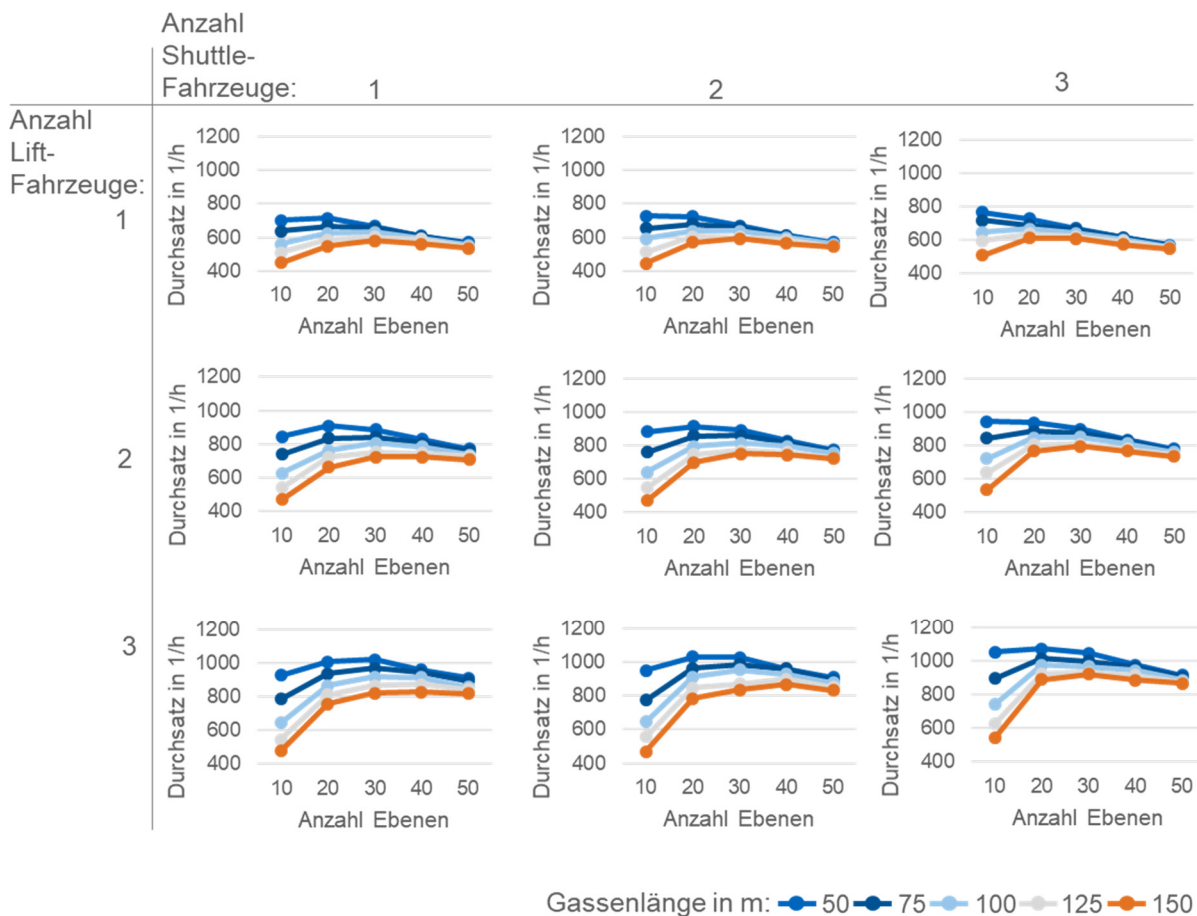


Abbildung 7-3: Durchsatzänderung unter Variation der Lagerdimensionen und Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge bei Anwendung der unbeschränkten Auftragsvergabe (Prioritätsregel NJ) und der Abstandsregelung für die Auftragsausführung

In Abbildung 7-4 sind die Durchsatz-Kennlinien unter Anwendung der ortsbeschränkten Auftragsvergabe aufgeführt. Hieraus ist erkennbar, dass mit steigender Anzahl an Ebenen der Durchsatz deutlich absinkt. Lediglich die Erhöhung auf drei Lift-Fahrzeuge bewirkt eine geringere Absenkung bei hohen Gassen. Durch Erhöhung der Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge lässt sich insbesondere bei niedrigen Gassen eine Durchsatzsteigerung erzielen.



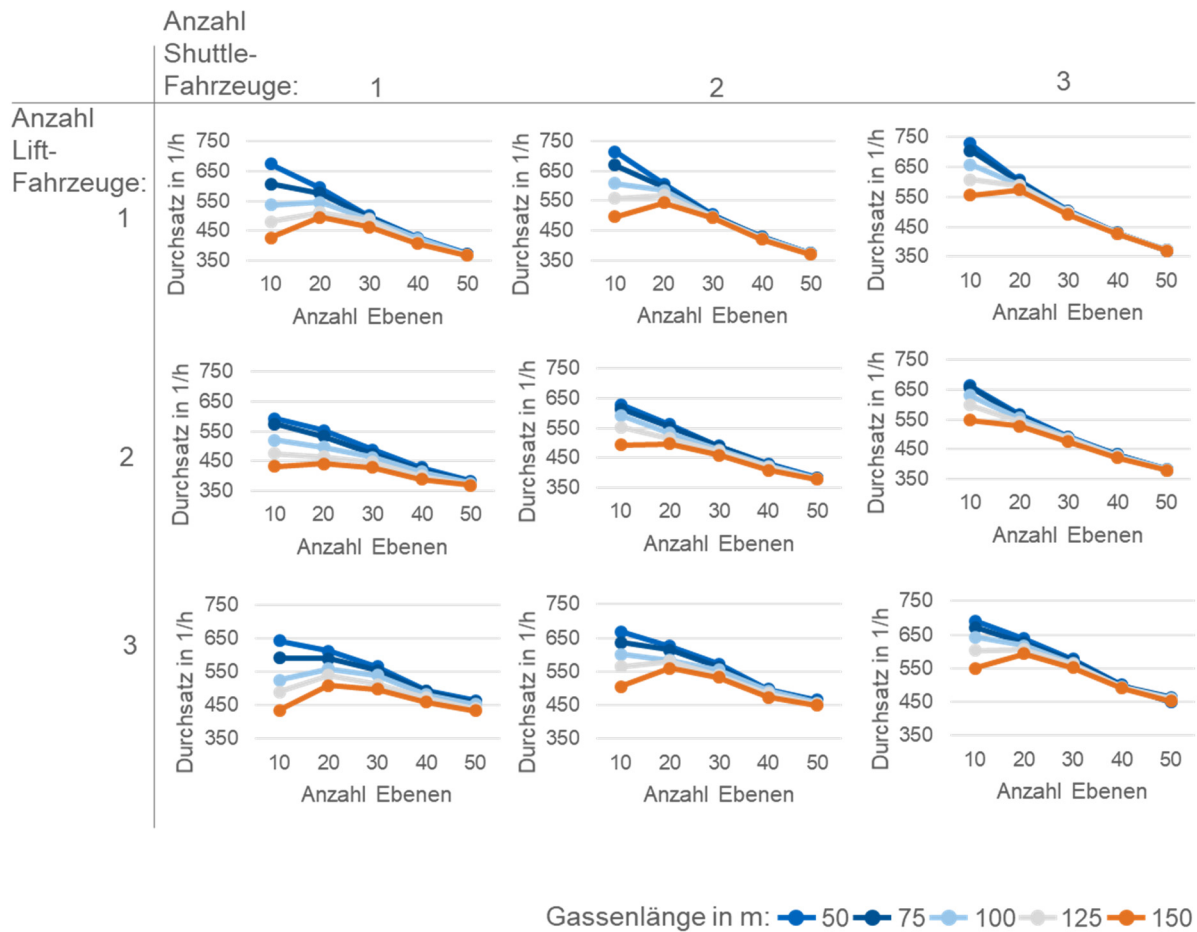


Abbildung 7-4: Durchsatzänderung unter Variation der Lagerdimensionen und Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge bei Anwendung der ortsbeschränkten Auftragsvergabe

### 7.3 Untersuchung der Leistungssteigerung unter Variation der Fahrzeuganzahl

Nach Auswahl der Lagerdimension erfolgt im nächsten Schritt die simulationsbasierte Untersuchung der Leistungssteigerung unter Variation der Anzahl an Lift- und Shuttle-Fahrzeugen. Innerhalb der betrachteten Konfiguration (Tabelle 7-1) und der ausgewählten Steuerung mittels unbeschränkter Auftragsvergabe (NJ) und Blockreservierung (Abbildung 7-2) wird dies exemplarisch anhand einer Dimension von *zehn Ebenen bei 50 m Gassenlänge* in Abbildung 7-5 aufgezeigt.

Daraus geht hervor, dass die größte Leistungssteigerung gegenüber dem Einsatz von einem Shuttle- und einem Lift-Fahrzeug durch den Einsatz eines zweiten Lift-Fahrzeugs erreicht wird. Damit kann je nach Anzahl der eingesetzten Shuttle-Fahrzeuge die Durchsatzleistung um ca. 9 % gesteigert werden. Weitere Lift- und Shuttle-Fahrzeuge erzielen deutlich geringere Leistungserhöhungen oder verringern sogar die

Durchsatzleistung. Dies ist beispielsweise beim Einsatz von vier Shuttle- und fünf Lift-Fahrzeugen zu beobachten.

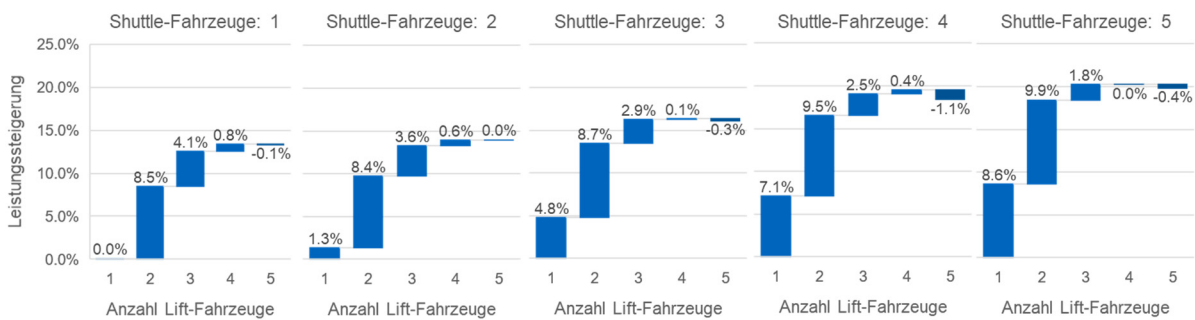


Abbildung 7-5: Leistungssteigerung unter Variation der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge bei Anwendung der unbeschränkten Auftragsvergabe (NJ) und der Blockreservierung

In Abbildung 7-6 sind die Leistungssteigerungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge und bei Anwendung der unbeschränkten Auftragsvergabe (NJ) sowie der Abstandsregelung exemplarisch für die Dimension von 30 Ebenen bei 100 m Gassenlänge aufgeführt.

Ebenso lässt sich hier die größte Leistungssteigerung durch den Einsatz eines zweiten Lift-Fahrzeugs beobachten. Je nach Anzahl der Shuttle-Fahrzeuge kann somit die Durchsatzleistung um mindestens 28 % erhöht werden. Zudem kann der Einsatz eines dritten Lift-Fahrzeugs einen nochmaligen Leistungssprung im zweistelligen Prozentbereich (mindestens 14 %) erzielen. Weitere Lift- und Shuttle-Fahrzeuge erhöhen die Durchsatzleistung stetig, allerdings in geringerem Maße. Dennoch lässt auch eine höhere Anzahl eingesetzter Lift- und Shuttle-Fahrzeuge die Durchsatzleistung nicht verringern.

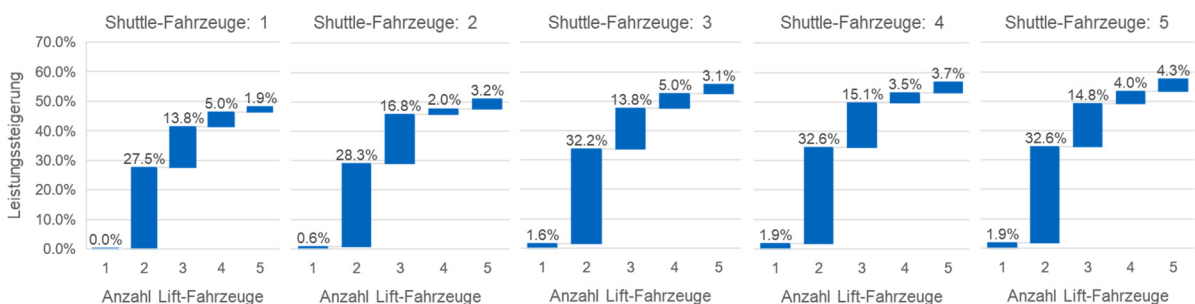


Abbildung 7-6: Leistungssteigerung unter Variation der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge bei Anwendung der unbeschränkten Auftragsvergabe (NJ) und der Abstandsregelung

Abbildung 7-7 zeigt die Leistungssteigerungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge und bei Anwendung der ortsbeschränkten Auftragsvergabe beispielhaft für die Dimension von 50 Ebenen bei 150 m Gassenlänge.

Hier wird eine Leistungssteigerung im zweistelligen Prozentbereich erst ab dem Einsatz von drei Lift-Fahrzeugen erreicht. Weitere Lift-Fahrzeuge können die Leistung mäßig steigern. Durch den Einsatz von mehreren Shuttle-Fahrzeugen lässt sich die Leistung in geringem Maße weiter erhöhen.

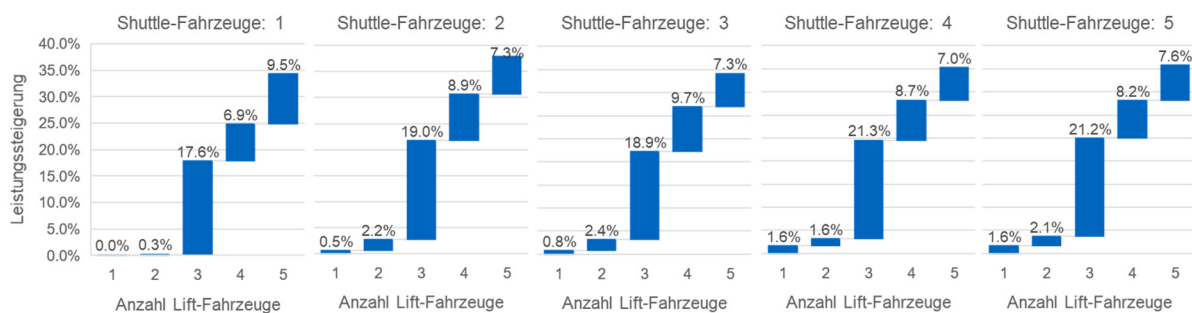


Abbildung 7-7: Leistungssteigerung unter Variation der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge bei Anwendung der ortsbeschränkten Auftragsvergabe

## 7.4 Diskussion zur Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen

Multi-Server-Shuttle-Systeme stellen eine bisher noch kaum beachtete Variante von Shuttle-Systemen dar, die gegenüber herkömmlichen Lösungen eine erhöhte Durchsatzleistung erzielen kann. Der Einsatz von mehreren Lift-Fahrzeugen je Lift und mehreren Shuttle-Fahrzeugen je Ebene ermöglicht allerdings eine Vielzahl unterschiedlicher Konfigurationen und macht die Durchsatzbestimmung zu einer Herausforderung. Mithilfe des entwickelten Simulationstools und auf Basis der beschriebenen Vorgehensweise zur Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen lässt sich die durchsatzoptimale Konfiguration in der jeweiligen Systemausprägung ermitteln. Dennoch ist abzuwägen, welcher Umfang der Leistungssteigerung den Einsatz von weiteren Lift- und Shuttle-Fahrzeugen rechtfertigt. Je nach Systemausprägung und angewandter Steuerungsstrategie fällt die Erhöhung des Durchsatzes durch weitere Fahrzeuge unterschiedlich aus. Dabei gilt grundsätzlich, dass mit steigender Anzahl an Lift- und Shuttle-Fahrzeugen die relative Leistungssteigerung abnimmt. Letztlich muss daher im Rahmen der Auslegung neben dem technischen Optimum auch das Kosten-Nutzen-Verhältnis berücksichtigt werden.



## 8 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

---

In diesem Kapitel werden die im Rahmen des Forschungsprojekts erzielten Forschungsergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf gegeben.

### 8.1 Zusammenfassung

Das Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung von Betriebsstrategien zur Steuerung von Multi-Server-Shuttle-Systemen und die Erstellung eines simulationsbasierten Softwaretools, in welches die Steuerungsstrategien eingebunden und unterschiedliche Konfigurationen von Multi-Server-Shuttle-Systemen analysiert und bewertet werden können.

Zunächst wurde eine strukturierte Literaturrecherche zum Stand der Technik und Forschung im Bereich der Auslegung und Steuerung von Shuttle- sowie Multi-Server-Systemen durchgeführt. Zudem wurden Experten befragt, um aktuelle Auslegungs- und Steuerungsverfahren von Shuttle-Systemen in der Praxis zu untersuchen. Es hat sich gezeigt, dass Multi-Server-Shuttle-Systeme in der Forschung und Entwicklung bislang nicht betrachtet wurden und damit eine neue Variante von Shuttle-Systemen darstellen.

Anhand der erstellten Übersicht unterschiedlicher Konfigurationen und Dimensionierungen von Multi-Server-Shuttle-Systemen konnten relevante Systemausprägungen identifiziert sowie deren Auswirkungen auf die Freiheitsgrade der Steuerung und somit auf die zu entwickelnden Steuerungsstrategien abgeleitet werden.

Zur Steuerung von Multi-Server-Shuttle-Systemen wurden Strategien für die Vergabe, Zuordnung und Ausführung von Aufträgen entworfen. Durch die Anwendung der entwickelten Steuerungsstrategien lassen sich Multi-Server-Shuttle-Systeme robust und effizient betreiben.

Für eine simulationsbasierte Durchsatzanalyse von unterschiedlichen Systemausprägungen wurden die Komponenten und Prozesse von Multi-Server-Shuttle-Systemen

modelliert und anschließend in einer Simulationsumgebung implementiert. Es entstand ein ablauffähiges Simulationsmodell zur Variation der Betriebsstrategien, Dimensionen, Konfigurationen und Randbedingungen.

Mithilfe des entwickelten Simulationsmodells wurden umfangreiche Parameterstudien zur Untersuchung der Forschungshypothese durchgeführt. So wurden verschiedene Kombinationen von Steuerungsstrategien, Dimensionierungen, Systemkonfigurationen und Randbedingungen mittels eines Experimentdesigns ermittelt und simuliert. Im Zuge dessen konnte gezeigt werden, dass Multi-Server-Shuttle-Systeme gegenüber herkömmlichen Shuttle-Systemen meist eine Steigerung der Durchsatzleistung verzeichnen können.

Auf Basis der Ergebnisse aus den Parameterstudien wurden Handlungsempfehlungen zur Konfiguration der Systeme in Form von Durchsatz-Kennlinien abgeleitet. Diese können als Richtwerte für die Auslegung herangezogen werden und dienen somit als Unterstützung in der Planungsphase für die optimale Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen.

## **8.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten**

Die im Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse sind für Hersteller, Planer und Betreiber von Shuttle-Systemen sowie für Softwareanbieter von Materialflussautomatisierung nutzbar und bieten ein Innovationspotential, das die Wettbewerbsfähigkeit insbesondere von KMU nachhaltig steigert. So können Hersteller von Shuttle-Systemen ihr Produktportfolio um die neue Systemvariante der Multi-Server-Shuttle-Systeme erweitern und damit hochdynamische Anforderungen abdecken.

Planer von Shuttle-Systemen hingegen können mithilfe der Handlungsempfehlungen die optimale Konfiguration eines auszulegenden Multi-Server-Shuttle-Systems ermitteln und somit eine zielgerichtete System- und Steuerungsauswahl treffen.

Zudem profitieren Betreiber von Shuttle-Systemen, da die neue Systemvariante durch die erhöhte Durchsatzleistung insbesondere dynamische Anwendungen ermöglicht.

Schließlich können Softwareanbieter im Bereich der Materialflussautomatisierung die untersuchten Betriebsstrategien zur Steuerung von Multi-Server-Shuttle-Systemen in die Softwareentwicklung einfließen lassen und somit das eigene Softwareangebot erweitern.

Der Softwaredemonstrator wird allen interessierten Unternehmen diskriminierungsfrei zur Verfügung gestellt. Somit besteht für alle Interessenten die Möglichkeit, das entwickelte Softwaretool zu verwenden und weiterzuentwickeln. Darüber hinaus werden die im Rahmen der weiteren Forschungsarbeiten erzielten Ergebnisse schrittweise in den Softwaredemonstrator eingearbeitet.

### **8.3 Förderhinweis**

Das IGF-Vorhaben 20002 N („OptiMUSS“) der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e.V. (BVL), Schlachte 31, 28195 Bremen, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung und Unterstützung sei gedankt.

### **8.4 Ausblick**

Die im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeiteten Ergebnisse zeigen, dass sich Multi-Server-Shuttle-Systeme robust und effizient betreiben lassen und diese damit eine neue Variante von Shuttle-Systemen im Hochleistungsbereich darstellen. Dabei wurde nach Absprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses die Forschungshypothese anhand einer Gasse eines Multi-Server-Shuttle-Systems untersucht. Für eine ganzheitliche Planung dieser neuen Systemvariante empfiehlt sich, mehrere Gassen zu betrachten und damit auch die Prozesse in der Lagervorzone zu berücksichtigen.

Auslagerungen in Sequenz führen gewöhnlich zu einer Durchsatzminderung im Shuttle-System. Daher soll untersucht werden, inwieweit sich sequenzierte Auslagerströme auf die Durchsatzleistung von Multi-Server-Shuttle-Systemen auswirken.

Darüber hinaus erfolgt im aktuellen Simulationsmodell die Lagerbelegung und Auftragserstellung zufallsbasiert. Um einen realen Lagerbetrieb abzubilden und damit zur Verbesserung der Praxistauglichkeit beizutragen, sollen im nächsten Schritt Lagerbelegungsstrategien umgesetzt werden und ihre Auswirkung auf die erzielbare Durchsatzleistung untersucht werden. In einer weiterführenden Evaluation sollen Multi-Ser-

ver-Shuttle-Systeme anhand von realen Auftragsdaten unter realen Lagerbedingungen simulativ untersucht werden und damit die Übertragung in die Praxis vorangetrieben werden.

Schließlich soll die weitergehende Forschung im Rahmen eines Dissertationsvorhabens des Autors stattfinden.



# Verzeichnis der Veröffentlichungen

---

## **Leistungsschub für Shuttle-Systeme**

Logistik für Unternehmen 6 / 2018

[Hab-2018]

## **Fahrzeugkoordination und -konfiguration in Hochleistungs-Shuttle-Systemen**

ASIM Fachtagung: Simulation in Produktion und Logistik 2019

[Hab-2019a]

## **Operating high-powered Automated Vehicle Storage and Retrieval Systems in multi-deep Storage.**

International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS) 2019

[Hab-2019b]

## **Scheduling Multiple Lift Vehicles in a Common Shaft in Automated Vehicle Storage and Retrieval Systems.**

International Workshop on Applied Modeling and Simulation (WAMS) 2019

[Hab-2019c]

## **Dynamic control of multiple vehicles moving along the same rail in automated vehicle storage and retrieval systems**

International Conference on Modeling and Applied Simulation (MAS) 2020

[Hab-2020a]

## **Vehicle Coordination and Configuration in High-powered Automated Vehicle Storage and Retrieval Systems**

Simulation Notes Europe (SNE) 2020

[Hab-2020b]



## Verzeichnis der studentischen Arbeiten

---

### **Entwicklung und Umsetzung eines modularen Konzepts zur Modellierung und Simulation von Shuttle-Systemen**

Bachelorarbeit von Björn Borchert

[Bor-2018]

### **Entwicklung und Umsetzung von Strategien zur Steuerung mehrerer Lift-Fahrzeuge in einem Schacht**

Semesterarbeit von Vincent Balducci

[Bal-2018]

### **Entwicklung und Umsetzung von Strategien zur Steuerung von mehreren Shuttle-Fahrzeugen pro Gasse bei mehrfachtiefer Lagerung**

Semesterarbeit von Valentin Plapp

[Pla-2019]

### **Entwicklung und simulative Bewertung von Optimierungsalgorithmen für den Vertikaltransport in Hochleistungs-Shuttle-Systemen**

Masterarbeit von Vincent Balducci

[Bal-2019]

### **Entwicklung und Umsetzung einer Abstandsregelung für Fahrzeuge in Shuttle-Systemen**

Bachelorarbeit von Lena Bacher

[Bac-2020]

### **Entwicklung und Umsetzung von Reservierungsstrategien für Fahrzeuge in Hochleistungs-Shuttle-Systemen auf Basis logischer Blockierungen**

Bachelorarbeit von Anna Rautenberg

[Rau-2020]

---

## **Effiziente Auftragsplanung für den Transport in Hochleistungs-Shuttle-Systemen**

Masterarbeit von Valentin Plapp

[Pla-2020]

## Literaturverzeichnis

---

- [Bac-2020] Bacher, L.: Entwicklung und Umsetzung einer Abstandsregelung für Fahrzeuge in Shuttle-Systemen. Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2020.
- [Bal-2018] Balducci, V.: Entwicklung und Umsetzung von Strategien zur Steuerung mehrerer Lift-Fahrzeuge in einem Schacht. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2018.
- [Bal-2019] Balducci, V.: Entwicklung und simulative Bewertung von Optimierungsalgorithmen für den Vertikaltransport in Hochleistungs-Shuttle-Systemen. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2019.
- [Bor-2018] Borchert, B.: Entwicklung und Umsetzung eines modularen Konzepts zur Modellierung und Simulation von Shuttle-Systemen. Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2018.
- [Car-2012] Carlo, H. J.; Vis, I. F.A.: Sequencing dynamic storage systems with multiple lifts and shuttles. In: International Journal of Production Economics, Jg. 140 (2012), S. 844–853.
- [Cie-2015] Cieplik, W.: Regalbediengerät oder Shuttle? In: Materialfluss, Jg. 46 (2015) Nr. 5, S. 30–31.
- [Dav-2015] Davarzani, H.; Norrman, A.: Toward a relevant agenda for warehousing research: literature review and practitioners' input. In: Logistics Research, Jg. 8 (2015) Nr. 1, S. 78.
- [Del-2009] Dell, R.; Royset, J.; Zyngiridis, I.: Optimizing container movements using one and two automated stacking cranes. In: Journal of Industrial & Management Optimization, Jg. 5 (2009) Nr. 2, S. 285–302.
- [Ede-2015] Eder, M.; Kartnig, G.: Throughput analysis of S/R shuttle systems and ideal geometry for high performance. In: Kartnig, G.; Zrnic, N.; Bosnjak, S. (Hrsg.): MHCL '15. Vienna University of Technology (TU

---

Wien), Institute for Engineering Design and Logistics Engineering, Belgrad, 2015, S. 193–198.

- [Ekr-2010a] Ekren, B. Y.; Heragu, S. S.; Krishnamurthy, A.; Malmborg, C. M.: Simulation based experimental design to identify factors affecting performance of AVS/RS. In: Computers & Industrial Engineering, Jg. 58 (2010), S. 175–185.
- [Ekr-2010b] Ekren, B. Y.; Heragu, S. S.: Simulation-based regression analysis for the rack configuration of an autonomous vehicle storage and retrieval system. In: International Journal of Production Research, Jg. 48 (2010) Nr. 21, S. 6257–6274.
- [Erd-2014] Erdoğan, G.; Battarra, M.; Laporte, G.: Scheduling twin robots on a line. In: Naval Research Logistics (NRL), Jg. 61 (2014) Nr. 2, S. 119–130.
- [FEM-9860] FEM European materials handling federation: Guideline Cycle time calculation for automated vehicle storage and retrieval systems. FEM Nr. 9860, 2017.
- [Fuk-2008] Fukunari, M.; Malmborg, C. M.: An efficient cycle time model for autonomous vehicle storage and retrieval systems. In: International Journal of Production Research, Jg. 46 (2008) Nr. 12, S. 3167–3184.
- [Ge-2012] Ge, P.; Wang, J.; Jin, M.; Ren, P.; Gao, H.: An Efficient Heuristic Algorithm for Overhead Cranes Scheduling Operations in workshop, 2012.
- [Geo-2012] Georg Kartnig; B. Grösel; Nenad Zrnić: Past, state-of-the-art and future of intralogistics in relation to megatrends. In: FME Transactions, Jg. 40 (2012), S. 193–200.
- [Gün-2008] Günthner, W. A.; Sanladerer, S.; Kraul, R.: Konfigurationsauswahl für automatische Lagersysteme – Forschungsbericht, 2008.
- [Gün-2011] Günthner, W. A.; Atz, T.; Ulbrich, A.: Integrierte Lagersystemplanung – Forschungsbericht, München, 2011.
- [Hab-2018] Habl, A.; Lienert, T.; Fottner, J.: Leistungsschub für Shuttle-Systeme. In: Logistik für Unternehmen (2018)

- 
- [Hab-2019a] Habl, A.; Lienert, T.; Pradines, G.; Fottner, J.: Fahrzeugkoordination und -konfiguration in Hochleistungs-Shuttle-Systemen. In: 18. ASIM Fachtagung, Simulation in Produktion und Logistik (2019)
- [Hab-2019b] Habl, A.; Plapp, V.; Fottner, J.: Operating high-powered Automated Vehicle Storage and Retrieval Systems in multi-deep Storage. In: Proceedings of the 9th International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS) (2019)
- [Hab-2019c] Habl, A.; Balducci, V.; Fottner, J.: Scheduling Multiple Lift Vehicles in a Common Shaft in Automated Vehicle Storage and Retrieval Systems. In: 12th International Workshop on Applied Modeling and Simulation (WAMS) (2019)
- [Hab-2020a] Habl, A.; Rautenberg, A.; Fottner, J.: Dynamic control of multiple vehicles moving along the same rail in automated vehicle storage and retrieval systems. In: 19th International Conference on Modeling and Applied Simulation (2020)
- [Hab-2020b] Habl, A.; Lienert, T.; Pradines, G.; Fottner, J.: Vehicle Coordination and Configuration in High-powered Automated Vehicle Storage and Retrieval Systems. In: SNE Simulation Notes Europe, Jg. 30 (2020) Nr. 4, S. 139–144.
- [Hom-2018] Hompel, M. ten; Schmidt, T.; Dregger, J.: Materialflusssysteme – Förder- und Lagertechnik. Springer Vieweg, Berlin, 2018.
- [Ish-2013] Ishihara, H.; Kato, S.: Multi-Car Elevator control using dynamic zoning2013 IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 2013, S. 546–549.
- [Kem-2011] Kemme, N.: RMG Crane Scheduling and Stacking – Overview and Implications on Terminal Planning. In: Böse, J. W. (Hrsg.): Handbook of Terminal Planning. Springer-Verlag, New York, 2011, S. 271–301.
- [Kun-2014] Kung, Y.; Kobayashi, Y.; Higashi, T.; Sugi, M.; Ota, J.: Order scheduling of multiple stacker cranes on common rails in an automated storage/retrieval system. In: International Journal of Production Research, Jg. 52 (2014) Nr. 4, S. 1171–1187.
- [Kuo-2007] Kuo, P.-H.; Krishnamurthy, A.; Malmborg, C. M.: Design models for unit load storage and retrieval systems using autonomous vehicle

- 
- technology and resource conserving storage and dwell point policies. In: Applied Mathematical Modelling, Jg. 31 (2007), S. 2332–2346.
- [Ler-2015] Lerher, T.; Ekren, B. Y.; Sari, Z.; Rosi, B.: Simulation analysis of shuttle based storage and retrieval systems. In: International Journal of Simulation Modelling, Jg. 14 (2015) Nr. 1, S. 48–59.
- [Lie-2016] Lienert, T.; Günthner, W. A.: Development and Simulation-Based Evaluation of an Algorithm for the Retrieval-in-Sequence for Shuttle Systems. In: Proceedings of the European Modeling and Simulation Symposium (2016)
- [Lim-2004] Lim, A.; Rodrigues, B.; Xu, Z.: Approximation Schemes for the Crane Scheduling Problem. In: Hagerup, T.; Katajainen, J. (Hrsg.): Algorithm Theory - SWAT 2004., Berlin Heidelberg, 2004, S. 323–335.
- [Mal-2002] Malmberg, C. M.: Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems. In: International Journal of Production Research, Jg. 40 (2002) Nr. 8, S. 1807–1822.
- [Mar-2012] Marchet, G.; Melacini, M.; Perotti, S.; Tappia, E.: Analytical model to estimate performances of autonomous vehicle storage and retrieval systems for product totes. In: International Journal of Production Research, Jg. 50 (2012) Nr. 24, S. 7134–7148.
- [Mar-2013] Marchet, G.; Melacini, M.; Perotti, S.; Tappia, E.: Development of a framework for the design of autonomous vehicle storage and retrieval systems. In: International Journal of Production Research, Jg. 51 (2013) Nr. 14, S. 4365–4387.
- [Mas-2018] Maschek, U.: Sicherung des Schienenverkehrs – Grundlagen und Planung der Leit- und Sicherungstechnik. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018.
- [Nin-2016] Ning, Z.; Lei, L.; Saipeng, Z.; Lodewijks, G.: An efficient simulation model for rack design in multi-elevator shuttle-based storage and retrieval system. In: Simulation Modelling Practice and Theory, Jg. 67 (2016), S. 100–116.
- [Pet-2014] Peterson, B.; Harjunoski, I.; Hoda, S.; Hooker, J. N.: Scheduling multiple factory cranes on a common track. In: Computers & Operations Research, Jg. 48 (2014), S. 102–112.



- 
- [Pla-2019] Plapp, V.: Entwicklung und Umsetzung von Strategien zur Steuerung von mehreren Shuttle-Fahrzeugen pro Gasse bei mehrfachtiefer Lagerung. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2019.
- [Pla-2020] Plapp, V.: Effiziente Auftragsplanung für den Transport in Hochleistungs-Shuttle-Systemen. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2020.
- [Rau-2020] Rautenberg, A.: Entwicklung und Umsetzung von Reservierungsstrategien für Fahrzeuge in Hochleistungs-Shuttle-Systemen auf Basis logischer Blockierungen. Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2020.
- [Sta-2010] Stahlbock, R.; Voß, S.: Efficiency considerations for sequencing and scheduling of double-rail-mounted gantry cranes at maritime container terminals. In: International Journal of Shipping and Transport Logistics, Jg. 2 (2010) Nr. 1, S. 95.
- [Tak-2003] Takahashi, S.; Kita, H.; Suzuki, T. S.; Markon, S.: Simulation-based optimization of a controller for multi-car elevators using a genetic algorithm for noisy fitness function. In: The 2003 Congress on Evolutionary Computation (2003) Nr. 3, S. 1582–1587.
- [Tan-2009] Tanaka, S.; Watanabe, M.: Optimization-based collision avoidance in multi-car elevator systems 2009 ICCAS-SICE, 2009, S. 764–769.
- [Tru-2014] Trummer, W.; Jodin, D.: Welche Leistung haben Shuttles? In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 54 (2014) Nr. 5, S. 240–242.
- [Val-2011] Valdivielso, A.; Miyamoto, T.: Multicar-Elevator Group Control Algorithm for Interference Prevention and Optimal Call Allocation. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, Jg. 41 (2011) Nr. 2, S. 311–322.
- [VDI-2692] Verein Deutscher Ingenieure: Shuttle-Systeme für Kleinbehälterlagerung. VDI Nr. 2692, 2015.
- [VDI-3633] Verein Deutscher Ingenieure: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen. VDI Nr. 3633, 2014.

- 
- [WEK-2017] WEKA BUSINESS MEDIEN GmbH: Materialfluss Markt 2018 (2017)
- [Zha-2018] 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. In: Computers & Industrial Engineering, Jg. 124 (2018), S. 48–57.

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1-1: Durchsatzbegrenzung und Steigerungspotential durch den Einsatz weiterer Lift- und Shuttle-Fahrzeuge	1
Abbildung 1-2: Verkettung von mehreren Multi-Server-Systemen in einer Gasse: Zwei Lift-Fahrzeuge im Liftschacht sowie jeweils zwei Shuttle-Fahrzeuge in den Ebenen	2
Abbildung 1-3: Schematische Darstellung einer Lagergasse eines Multi-Server-Shuttle-Systems	4
Abbildung 1-4: Beschreibung und Zuordnung der Arbeitspakete des Forschungsprojekts zu den Kapiteln des Forschungsberichts	5
Abbildung 2-1: Lagergasse eines Shuttle-Systems mit gassen- und ebenengebundenen Shuttle-Fahrzeugen und Behälterliften (Quelle: TGW Logistics Group GmbH)	8
Abbildung 2-2: Klassifizierung der Shuttle-Systeme nach den Bewegungsachsen der Shuttle-Fahrzeuge nach [Hab-2018]	9
Abbildung 2-3: Auslegungsverfahren von Shuttle-Systemen in der Praxis	11
Abbildung 2-4: Steuerungsverfahren von Shuttle-Systemen in der Praxis	13
Abbildung 2-5: Zwei Portalkrane auf derselben Führungsschiene nach [Del-2009]	14
Abbildung 2-6: Mehrere Aufzugskabinen je Schacht nach [Tan-2009]	15
Abbildung 2-7: Zwei Roboter auf einer gemeinsamen Führungsschiene [Erd-2014]	15
Abbildung 2-8: Zwei Regalbediengeräte auf einer gemeinsamen Schiene [Kun-2014]	16
Abbildung 2-9: Blocksicherung im Bahnverkehr nach [Mas-2018]	16
Abbildung 3-1: Flussdiagramm einer Einlagerung	24
Abbildung 3-2: Flussdiagramm einer Auslagerung	24
Abbildung 3-3: Flussdiagramm einer Umlagerung mit anschließender Auslagerung	25
Abbildung 4-1: Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen	27
Abbildung 4-2: Funktionsbeschränkte Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen	28
Abbildung 4-3: Ortsbeschränkte Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen	29
Abbildung 4-4: Unbeschränkte Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen	29
Abbildung 4-5: Auftragszuordnung in Multi-Server-Shuttle-Systemen	30

---

Abbildung 4-6: Sukzessive bzw. simultane Zuordnung der Aufträge in Multi-Server-Shuttle-Systemen	33
Abbildung 4-7: Ausführung der Aufträge mittels einer Blockreservierung	34
Abbildung 4-8: Ausführung der Aufträge mittels einer Abstandsregelung	34
Abbildung 5-1: Systemkomponenten eines Shuttle-Systems	35
Abbildung 5-2: Modellierung einer Ebene in einem Shuttle-System	36
Abbildung 5-3: Modellierung eines Lifts in einem Shuttle-System	36
Abbildung 5-4: v-t-Diagramm einer Trapez- und Dreiecksfahrt für $a_{acc} = a_{dec}$	37
Abbildung 5-5: Einlagerungsprozess einer TE	38
Abbildung 5-6: Auslagerungsprozess einer TE	38
Abbildung 5-7: Umlagerungsprozess einer TE	39
Abbildung 5-8: Funktionsmodule des Simulationsmodells	39
Abbildung 5-9: Simulationsmodell eines Multi-Server-Shuttle-Systems mit zehn Ebenen	41
Abbildung 5-10: Simulationsmodell eines Multi-Server-Shuttle-Systems mit zwei Liften	42
Abbildung 5-11: Auftragsdurchführung in Multi-Server-Shuttle-Systemen	43
Abbildung 6-1: Abweichung der Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der Simulationszeit und Fahrzeuganzahl (Referenz: 10 h)	47
Abbildung 6-2: Identifikation der Warm-Up Phase über die Anzahl abgeschlossener Aufträge je Minute und die Änderung des gleitenden Mittelwerts	48
Abbildung 6-3: Durchsatzleistung und Auslastung der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen in der Gasse	49
Abbildung 6-4: Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen und Shuttle-Fahrzeuge	50
Abbildung 6-5: Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen und Lift-Fahrzeuge	51
Abbildung 6-6: Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen und Fahrzeugpaare von Lift- und Shuttle-Fahrzeugen	52
Abbildung 6-7: Vorgehensweise zur Erstellung des Testplans	55
Abbildung 6-8: Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der Konfiguration und Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge	56
Abbildung 6-9: Durchschnittliche Leistungssteigerung in den betrachteten Konfigurationen in Abhängigkeit von der Anzahl der eingesetzten Lift- und Shuttle-Fahrzeuge (Referenz: Durchsatz des Single-Server-Systems)	57

---

Abbildung 6-10: Durchsatzleistung in Abhängigkeit von der Vergabestrategie und Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge	59
Abbildung 6-11: Durchsatzleistung der funktionsbeschränkten Vergabestrategie in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen sowie der Länge der Gasse	60
Abbildung 6-12: Durchsatzleistung der ortsbeschränkten Vergabestrategie in Abhängigkeit von der Anzahl der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge	61
Abbildung 6-13: Durchsatzleistung der unbeschränkten Vergabestrategie mit fahrzeugbasierten Prioritätsregeln in Abhängigkeit von der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge	62
Abbildung 6-14: Durchsatzleistung der unbeschränkten Vergabestrategie mit auftragsbasierten Prioritätsregeln in Abhängigkeit von der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge	63
Abbildung 6-15: Durchsatzleistung der unbeschränkten Vergabestrategie mit auftragsbasierten Prioritätsregeln (NV) in Abhängigkeit von der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge	64
Abbildung 6-16: Durchsatzleistung der Zuordnungsstrategien in Abhängigkeit von der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge	65
Abbildung 6-17: Durchsatzleistung der Ausführungsstrategien in Abhängigkeit von der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge	66
Abbildung 7-1: Vorgehensweise zur Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen	70
Abbildung 7-2: Durchsatzänderung unter Variation der Lagerdimensionen und Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge bei Anwendung der unbeschränkten Auftragsvergabe (Prioritätsregel NJ) und der Blockreservierung für die Auftragsausführung	71
Abbildung 7-3: Durchsatzänderung unter Variation der Lagerdimensionen und Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge bei Anwendung der unbeschränkten Auftragsvergabe (Prioritätsregel NJ) und der Abstandsregelung für die Auftragsausführung	72
Abbildung 7-4: Durchsatzänderung unter Variation der Lagerdimensionen und Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge bei Anwendung der ortsbeschränkten Auftragsvergabe	73
Abbildung 7-5: Leistungssteigerung unter Variation der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge bei Anwendung der unbeschränkten Auftragsvergabe (NJ) und der Blockreservierung	74
Abbildung 7-6: Leistungssteigerung unter Variation der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge bei Anwendung der unbeschränkten Auftragsvergabe (NJ) und der Abstandsregelung	74
Abbildung 7-7: Leistungssteigerung unter Variation der Anzahl der Lift- und Shuttle-Fahrzeuge bei Anwendung der ortsbeschränkten Auftragsvergabe	75



## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 3-1:	Morphologischer Kasten der Dimensionierung von Multi-Server-Shuttle-Systemen	19
Tabelle 3-2:	Morphologischer Kasten der liftbezogenen Konfiguration je Gasse	21
Tabelle 3-3:	Morphologischer Kasten der ebenenbezogenen Konfiguration je Gasse	22
Tabelle 3-4:	Katalog der Freiheitsgrade der Steuerung je Konfigurationsparameter	26
Tabelle 6-1:	Betrachtete Eingabe- und Ausgabeparameter des Simulationsmodells	46
Tabelle 6-2:	Auszug aus den betrachteten Grundkonfigurationen	53
Tabelle 6-3:	Betrachtete Parameter und deren Wertebereiche in den Einzelkonfigurationen	54
Tabelle 6-4:	Kinematische Parameter der Fahrzeuge zum Vergleich der Steuerungsstrategien	58
Tabelle 6-5:	Parameterwerte der Systemausprägung zum Vergleich der Vergabestrategien	58
Tabelle 6-6:	Parameterwerte der Systemausprägung zur Untersuchung der funktionsbeschränkten Vergabestrategie	59
Tabelle 6-7:	Parameterwerte der Systemausprägung zur Untersuchung der ortsbeschränkten Vergabestrategie	61
Tabelle 6-8:	Parameterwerte der Systemausprägung zur Untersuchung der unbeschränkten Vergabestrategie und Prioritätsregeln	62
Tabelle 7-1:	Parameterwerte der Konfiguration zur Untersuchung der Durchsatzänderung unter Variation der Dimensionen	70





# Anhang A Leitfaden Experteninterview

*Tabelle A-1: Leitfaden Experteninterview – Auslegung von Shuttle-Systemen*

## Auslegung von Shuttle-Systemen

Vorgehen bei der Auslegung von Shuttle-Systemen in der Praxis (Quelle: Diskussion 1. Projekt-treffen OptiMUSS):

1. Erste Abschätzung mithilfe von Expertenwissen/Erfahrungen unter Einbeziehung der gegebenen Randbedingungen (z. B. mögliche räumliche Ausdehnung des Lagers, Lagerfüllgrad, Anzahl Stellplätze)
2. Analytische Leistungsberechnung (FEM 9.860 und Komponentenspezifikationen)
3. Absicherung durch Simulation

**1.1** Weicht das Verfahren in Ihrem Unternehmen vom obigen Vorgehen ab und wenn ja, wo?

**1.2** Haben Sie noch Ergänzungen hinsichtlich des Auslegungsprozesses?

Wie laufen diese Prozessschritte in Ihrem Unternehmen ab?

- 1.3
  - Welche Entscheidungen werden in welchem Schritt getroffen (wann wird beispielsweise der Shuttle-Typ festgelegt)?
  - Wie sehen die einzelnen Prozesse in Ihrem Unternehmen aus (z. B. analytische Berechnung)?
  - Welche Software wird in den einzelnen Prozessen verwendet?

Aufgenommene Randbedingungen (Quelle: Diskussion 1. Projekt-treffen OptiMUSS):

2. Anzahl Lagerplätze, Lagerfüllgrad, Shuttle-Typ, Leistungsanforderung, Durchlaufzeiten, technische Möglichkeiten des Anbieters, Erweiterungsflexibilität, Leistungsanforderung, Verfügbarkeit, Brandschutzeinschränkungen, Statik des Regals, Nachschubprozess

**2.1** Existieren noch weitere relevante Randbedingungen?

**2.2** Welche Probleme/Herausforderungen treten hierbei auf?

**2.3** Wo sehen Sie das größte Verbesserungspotential bei der Auslegung?

*Tabelle A-2: Leitfaden Experteninterview – Steuerung von Shuttle-Systemen*

## Steuerung von Shuttle-Systemen

Steuerungsstrategien und -abläufe von Shuttle-Systemen in der Praxis (Quelle: Diskussion 1. Projekt-treffen OptiMUSS):

1.
  - Zuweisung der Transportaufträge an die Shuttle-Fahrzeuge durch die Gassensteuerung
  - Keine strategischen Entscheidungen seitens der Shuttle-Fahrzeuge

- 
- Strategien: Verhinderung von Fragmentierung, Gleichverteilung der Aufträge, Minimierung der Transporte, projektspezifische Auslagerstrategien

**1.1** Welche Steuerungsverfahren werden in Ihrem Unternehmen angewendet?

**1.2** Inwieweit werden Strategien in Abhängigkeit vom Anwendungsfall variiert?

**1.3** Wie ist die Steuerungsarchitektur aufgebaut bzw. welche Ebene trifft welche Entscheidung?

**1.4** Welche Nebenbedingungen, wie bspw. Sicherheit und Wartung, müssen erfüllt werden?

**1.5** Welche Probleme/Herausforderungen treten hierbei auf?