

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 20002 N

## Thema

Optimale Konfiguration von Multi-Server-Shuttle-Systemen

## Berichtszeitraum

01.04.2018 bis 30.09.2020

## Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

Schlachte 31, 28195 Bremen

## Forschungseinrichtung(en)

1: Technische Universität München,

Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss und Logistik (fml)

Boltzmannstraße 15, 85748 Garching

München, 15.01.2021

---

Ort, Datum

Andreas Habl



---

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

# 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	3
1.3 Vorgehensweise und Lösungsweg	4
<b>2 Stand der Technik und Forschung</b>	<b>7</b>
2.1 Shuttle-Systeme	7
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise	7
2.1.1 Klassifizierung und Eingrenzung	8
2.1.2 Auslegung	9
2.1.3 Steuerung	12
2.2 Multi-Server-Systeme	13
2.2.1 Krane	13
2.2.2 Aufzüge	14
2.2.3 Roboter	15
2.2.4 Regalbediengeräte	15
2.2.5 Züge	16
2.3 Zwischenfazit und Forschungsbedarf	16
<b>3 Ausprägungen von Multi-Server-Shuttle-Systemen</b>	<b>17</b>
3.1 Dimensionierung	17
3.2 Konfiguration	17
3.2.1 Liftbezogene Parameter	18
3.2.2 Ebenenbezogene Parameter	18
3.3 Steuerung	19
<b>4 Entwicklung von Steuerungsstrategien</b>	<b>21</b>
4.1 Vergabe von Aufträgen	21
4.1.1 Funktionsbeschränkte Vergabe	22
4.1.2 Ortsbeschränkte Vergabe	23
4.1.3 Unbeschränkte Vergabe	23

4.2	Zuordnung von Aufträgen	24
4.2.1	Sukzessive Zuordnung	24
4.2.2	Simultane Zuordnung	26
4.3	Ausführung von Aufträgen	27
4.3.1	Blockreservierung	27
4.3.2	Abstandsregelung	27
<b>5</b>	<b>Modellierung und Implementierung eines Simulationsmodells</b>	<b>29</b>
5.1	Modellierung der Systemkomponenten	29
5.1.1	Ebene	29
5.1.2	Lift	30
5.2	Modellierung der Fahrzeugdynamik	31
5.3	Modellierung der Lagerprozesse	32
5.3.1	Einlagerung	32
5.3.2	Auslagerung	32
5.3.3	Umlagerung	32
5.4	Implementierung des Simulationsmodells	33
5.4.1	Funktionsmodule	33
5.4.1	Systemkomponenten	35
5.4.2	Fahrzeugdynamik	36
5.4.3	Lagerprozesse	36
<b>6</b>	<b>Durchführung von Parameterstudien</b>	<b>39</b>
6.1	Eingabe- und Ausgabeparameter	39
6.2	Vorstudien	40
6.2.1	Simulationszeit	40
6.3	Ein- und Ausschwingphase	41
6.4	Hauptstudie	42
6.4.1	Überprüfung der Forschungshypothese	42
6.4.2	Experimentdesign	44
6.4.3	Betrachtungen zur Durchsatzleistung	45
6.5	Einzelstudien	46
6.5.1	Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Vergabestrategie	46
6.5.2	Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Zuordnungsstrategie	48
6.5.3	Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Prioritätsregel	48
6.5.4	Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Ausführungsstrategie	49

<b>7</b>	<b>Ableitung von Handlungsempfehlungen</b>	<b>51</b>
7.1	Durchsatzänderung unter Variation der Dimensionen	51
7.2	Leistungssteigerung unter Variation der Fahrzeuganzahl	53
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick</b>	<b>55</b>
8.1	Zusammenfassung	55
8.2	Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	56
8.3	Verwendung der zugewendeten Mittel	57
8.4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	58
8.5	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	58
8.5.1	Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	58
8.5.2	Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	62
8.5.3	Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts	63
8.6	Durchführende Forschungsstelle	64
8.7	Förderhinweis	65
8.8	Ausblick	65
<b>9</b>	<b>Verzeichnis der Veröffentlichungen</b>	<b>67</b>
<b>10</b>	<b>Verzeichnis der studentischen Arbeiten</b>	<b>69</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>71</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>77</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>81</b>
	<b>Anhang A Leitfaden Experteninterview</b>	<b>A-1</b>



# 1 Einleitung

Shuttle-Systeme bilden eine flexible und leistungsfähige Möglichkeit zur automatisierten Lagerung von Transporteinheiten. 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 Ladeeinheiten 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 bauliche 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 ebene-gebundenen Shuttle-Fahrzeugen für den Horizontaltransport in Verbindung mit Behälterliften zur Ausführung des Vertikaltransports. In diesen Systemen wird der maximal erzielbare Durchsatz durch die Leistungsfähigkeit der einzelnen Fahrzeuge begrenzt. Allerdings wird bisher nur jeweils ein Shuttle-Fahrzeug je Gasse und Ebene sowie ein Lift-Fahrzeug je Behälterlift eingesetzt. Um die Durchsatzleistung innerhalb einer Gasse zu steigern, kann jedoch die Fahrzeuganzahl in Ebene und Lift erhöht werden (Abbildung 1-1).

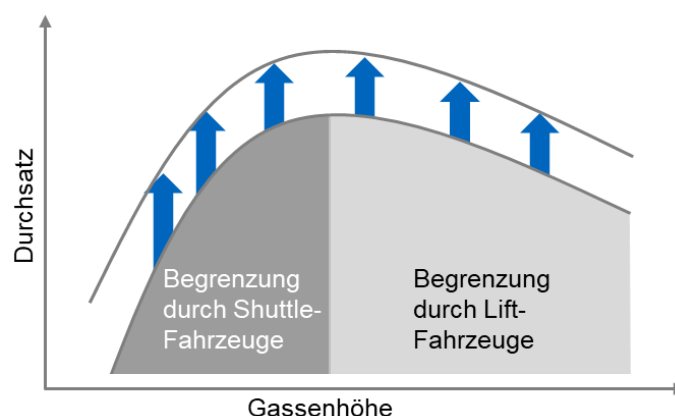


Abbildung 1-1: Durchsatzbegrenzung und Steigerungspotential durch den Einsatz weiterer Shuttle und Lift-Fahrzeuge

Der Betrieb dieses neuen Systemtyps setzt jedoch hohe Anforderungen zur robusten und effizienten Koordination der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge. Zudem stellt die Planung bzw. Konfiguration solcher Systeme eine neue Herausforderung dar.

## 1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

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

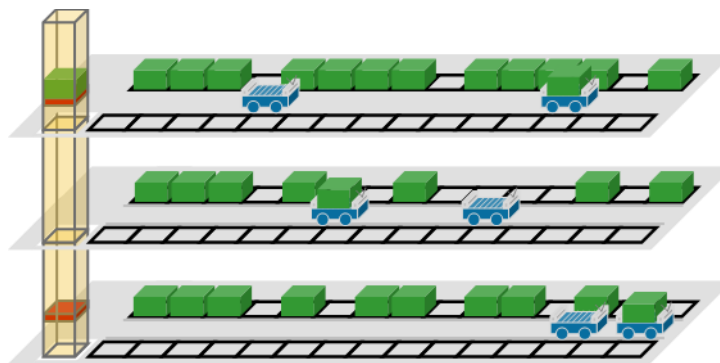


Abbildung 1-2: Verkettung von mehreren Multi-Server-Systemen in einer Gasse: Zwei Lift-Fahrzeuge im Liftschacht sowie jeweils zwei Shuttle-Fahrzeuge in den Ebenen

Die daraus resultierenden Multi-Server-Shuttle-Systeme erfordern erweiterte Steuerungsstrategien für einen robusten sowie effizienten Betrieb und bieten eine Vielzahl an unterschiedlichen Ausprägungen hinsichtlich der Systemkonfiguration und Dimensionierung für eine zielgerichtete Auslegung.

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 allgemeine Abläufe im Lift und in der Ebene sowie an deren Schnittstellen zu regeln.

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, bei 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, Konfiguration und Dimensionierung durch lagerspezifische Randbedingungen. So sind beispielsweise die räumlichen Gegebenheiten, die Auftragsstrukturen oder der Lagerfüllgrad beim Betrieb und bei der Auslegung des Lagers zu berücksichtigen.

Multi-Server-Shuttle-Systeme stellen eine neue Ausprägung 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 Underdimensionierungen 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 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 Konfigurationen



von Multi-Server-Shuttle-Systemen und ermöglicht die Ableitung von Handlungsempfehlungen für deren Auslegung.

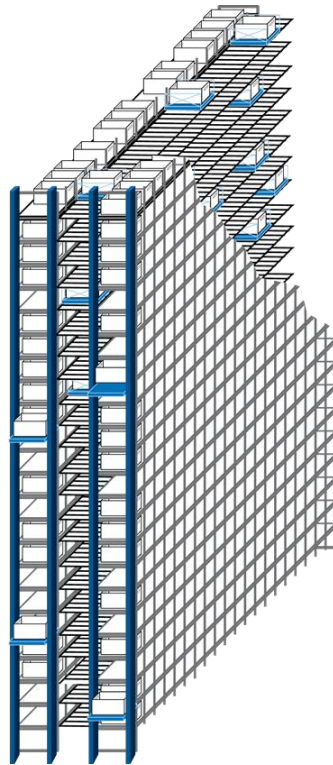


Abbildung 1-3: Schematische Darstellung einer Lagergasse eines Multi-Server-Shuttle-Systems

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 die im Forschungsantrag definierten Arbeitspakete (AP) des Projekts. Abbildung 1-4 zeigt deren Zuordnung zu den Kapiteln.



Abbildung 1-4: Zuordnung der Arbeitspakete zu den Kapiteln des Schlussberichts

In **Kapitel 2** werden die Ergebnisse des Arbeitspakets 1 (Stand der Technik von Shuttle- und Multi-Server-Systemen) beschrieben. Ziel des Arbeitspakets ist mittels Experteninterviews und strukturierter Literaturrecherche einen Überblick über Auslegungs- und Steuerungsverfahren von Shuttle- sowie Multi-Server-Systemen in Wissenschaft und Praxis zu erlangen.

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

Die Ergebnisse von Arbeitspaket 3 (Entwicklung von Steuerungsstrategien) werden in **Kapitel 4** präsentiert. Hierzu werden die Algorithmen und Abläufe formal beschrieben.

Das Arbeitspaket 4 (Modellierung und Implementierung eines Simulationsmodells) wird in **Kapitel 5** erläutert. Hierzu werden die Komponenten und Prozesse in Multi-Server-Shuttle-Systemen modelliert und in einer Simulationsumgebung implementiert.

Die in Arbeitspaket 5 (Parameterstudien zur Untersuchung der Forschungshypothese) durchgeführten Simulationsstudien werden in **Kapitel 6** beschrieben. 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 Handlungsanweisungen für die Auslegung von Multi-Server-Shuttle-Systemen formuliert.

Abschließend werden in **Kapitel 8** die erzielten Forschungsergebnisse zusammengefasst und zukünftige Forschungsarbeiten dargelegt.

## 2 Stand der Technik und Forschung

---

Dieses Kapitel beinhaltet mit dem Stand der Technik und Forschung die Grundlagen 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 dazu verwendete Fragebogen ist in Leitfaden Experteninterview dargestellt. Das Kapitel schließt mit einem Fazit zum Stand der Forschung 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 Ladeeinheiten wie Behälter, Schachteln oder Tablare gelagert werden [Hom-2018]. Als Einstieg wird zunächst der Aufbau und die Funktionsweise dieses Lagersystems beschrieben. Es folgt eine Klassifizierung der auf dem Markt befindlichen Shuttle-Systeme mit anschließender Eingrenzung auf den betrachteten Systemtyp. 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 Ladeeinheiten und stellt die weitgehende Trennung von Horizontal- und Vertikaltransport als wesentliches Merkmal dieser Technologie heraus. So verfahren die Shuttle-Fahrzeuge im Regal auf der jeweiligen Fahrschiene in horizontaler Richtung (x-Achse), wohingegen sich die Lift-Fahrzeuge im jeweiligen Liftschacht in vertikaler Richtung bewegen (y-Achse). Das LAM der Shuttle-Fahrzeuge greift in Gangquerrichtung (z-Achse) auf die Ladeeinheiten zu. So transportiert bei einer Einlagerung der Lift die Ladeeinheit von der Einlagerebene in die entsprechende Lagerebene und übergibt dort an das Shuttle-Fahrzeug, welches die Ladeeinheit bis zum Lagerort transportiert und über das LAM abgibt. Bei einer Auslagerung wird die Ladeeinheit durch das Shuttle-Fahrzeug am Lagerort aufgenommen und zum Übergabepunkt des Lifts transportiert, von welchem das Lift-Fahrzeug wiederum die Ladeeinheit zur Auslagerebene bewegt [VDI-2692].

Der Aufbau einer Lagergasse mit Shuttle- und Lift-Fahrzeugen sowie deren Bewegungsrichtungen ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Ein System mit Behälterliften an der Stirnseite der Gasse mit jeweils einem Shuttle-Fahrzeug auf den Ebenen.

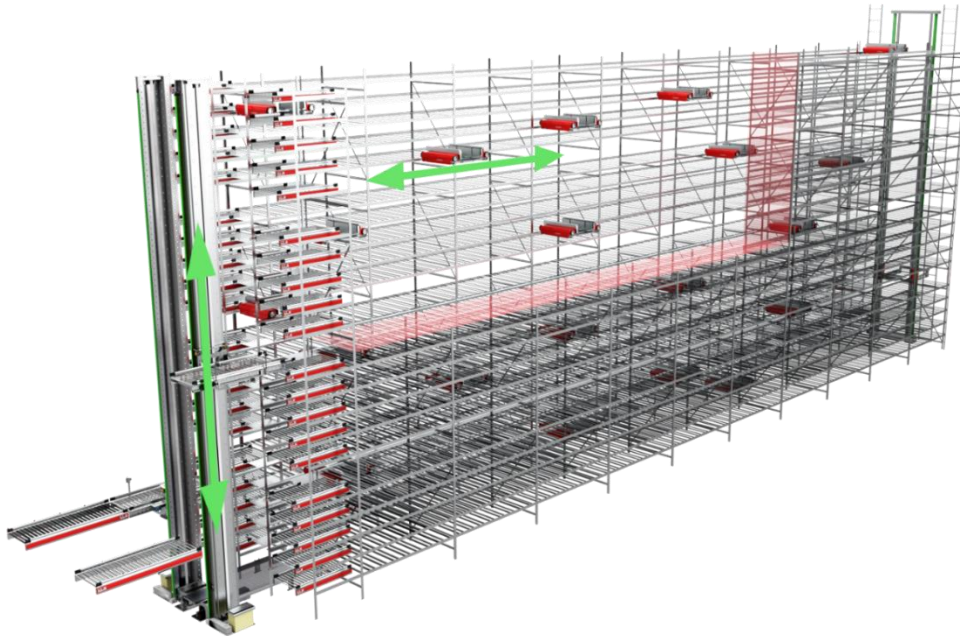


Abbildung 2-1: Lagergasse eines Shuttle-Systems mit Behälterliften (Quelle: TGW Logistics Group GmbH)

### 2.1.1 Klassifizierung und Eingrenzung

Shuttle-Systeme werden grundsätzlich in Systeme mit Behälterliften und Fahrzeugliften 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 Ladeeinheiten 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. Ladeeinheiten können somit durch das Shuttle-Fahrzeug auch in vertikaler Richtung transportiert werden. Dies ermöglicht eine geringere Anzahl benötigter Shuttle-Fahrzeuge gegenüber Systeme 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].

Es 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 Gassen- und Ebenenwechsel 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 Fahrzeugaufzug oder bei einem Gassenwechsel längere Fahrtzeiten ergeben.

In Variante 1 sind Horizontal- und Vertikaltransport vollständig entkoppelt. Demnach können in dieser Ausprägung 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 und gassen- und ebenengebundenen Shuttle-Fahrzeugen den Gegenstand der wissenschaftlichen Untersuchung.

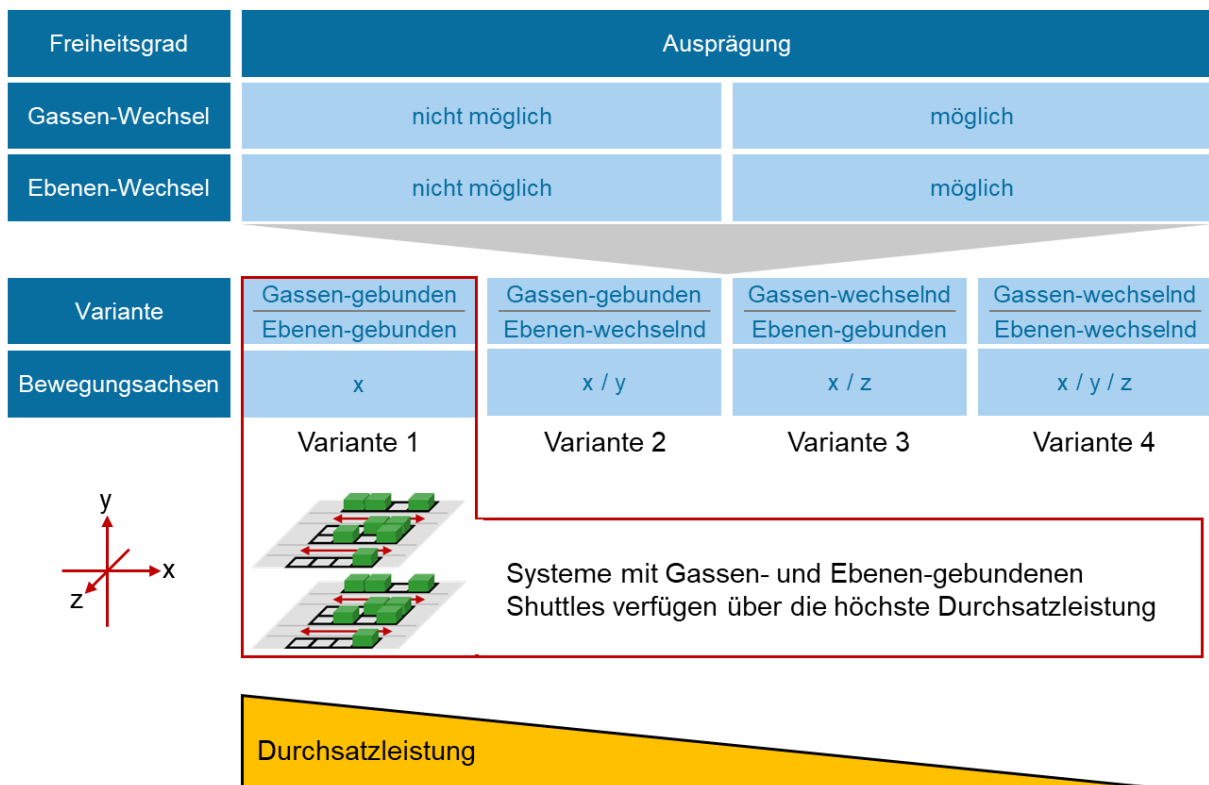


Abbildung 2-2: Klassifizierung der Shuttle-Systeme nach den Bewegungsachsen der Shuttle-Fahrzeuge nach [Hab-2018]

### 2.1.2 Auslegung

Gegenüber herkömmlichen automatischen Kleinteilelagern bieten Shuttle-Systeme eine höhere Durchsatzleistung sowie 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 Ladeeinheit
- 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 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 Dimensionierung 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 sämtliche Systemkonfigurationen und Betriebsstrategien abzubilden [Gün-2008].

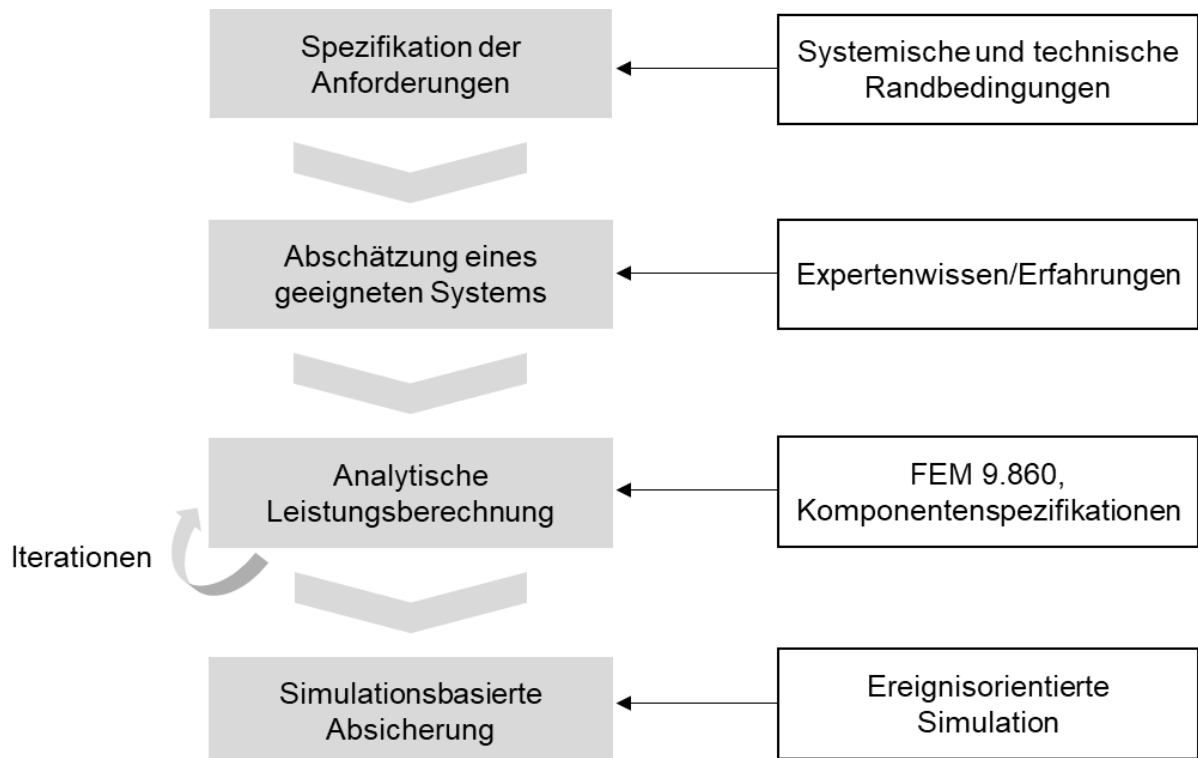


Abbildung 2-3: Auslegungsverfahren von Shuttle-Systemen in der Praxis

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 oder einem Fahrzeuglift je Gasse, einfachtiefer Lagerung und gleicher Anfahrscheinlichkeit 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 ein analytisches Modell vor, welches die Durchsatzberechnung von Shuttle-Systemen mit gassen- und ebene-gebundenen Shuttle-Fahrzeugen und einem Behälterlift je Gasse erlaubt [Mar-2012].

Das von *Eder und Kartnig* entwickelte analytische Modell betrachtet Shuttle-Systeme mit gassen- und ebene-gebundenen 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 ein analytisches Modell für die Durchsatzberechnung von Shuttle-Systemen mit gassen- und ebene-wechselnden Shuttle-Fahrzeugen und einem Fahrzeuglift in jeder Gasse [Mal-2002]. Zudem existieren für Shuttle-Systeme mit



Fahrzeugliften analytische Modelle zur effizienten Spielzeitberechnung [Kuo-2007] und zur Berechnung der Zykluszeit unter Berücksichtigung günstiger Kombinationen von Fahraufträgen der Fahrzeuglifte [Fuk-2008].

Neben den analytischen Ansätzen bestehen 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* führen eine simulationsbasierte Regressionsanalyse durch, um die durchsatzoptimale Dimension eines Shuttle-Systems mit Fahrzeugliften zu ermitteln [Ekr-2010b]. Sie stellen zudem ein Experimentdesign vor, mit dem sich mithilfe von Simulation Einflussfaktoren auf den Durchsatz bestimmen lassen [Ekr-2010a]. *Trummer und Jodin* präsentieren ein Berechnungstool zur Durchsatzbestimmung von Shuttle-Systemen mit Behälter- und Fahrzeugliften mittels der Monte-Carlo-Simulation [Tru-2014].

### 2.1.3 Steuerung

Die Steuerung von Shuttle-Systemen ist hierarchisch strukturiert und in Abbildung 2-4 dargestellt. Während das übergreifende Lagerverwaltungssystem die Transportaufträge verwaltet, werden diese durch den Materialflussrechner auf die Gassen verteilt. Die jeweilige Gassensteuerung weist die Aufträge an die Fahrzeuge zu, welche schließlich die Ausführung der Aufträge übernehmen.

Die erzielbare Durchsatzleistung von Shuttle-Systemen wird maßgeblich von deren Steuerung beeinflusst. Einfach konfigurierte Shuttle-Systeme, beispielsweise in [Mar-2012] und [Mal-2002], können mithilfe von Prioritätsregeln wie *first come first served* gesteuert werden. Insbesondere bei vorgegebener Auslagersequenz von Ladeeinheiten reichen einfache Prioritätsregeln jedoch nicht mehr aus. *Lienert und Günthner* präsentieren einen zeitenfensterbasierten Ansatz zur Steuerung von Shuttle-Systemen mit gassen- und ebenen-wechselnden 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].

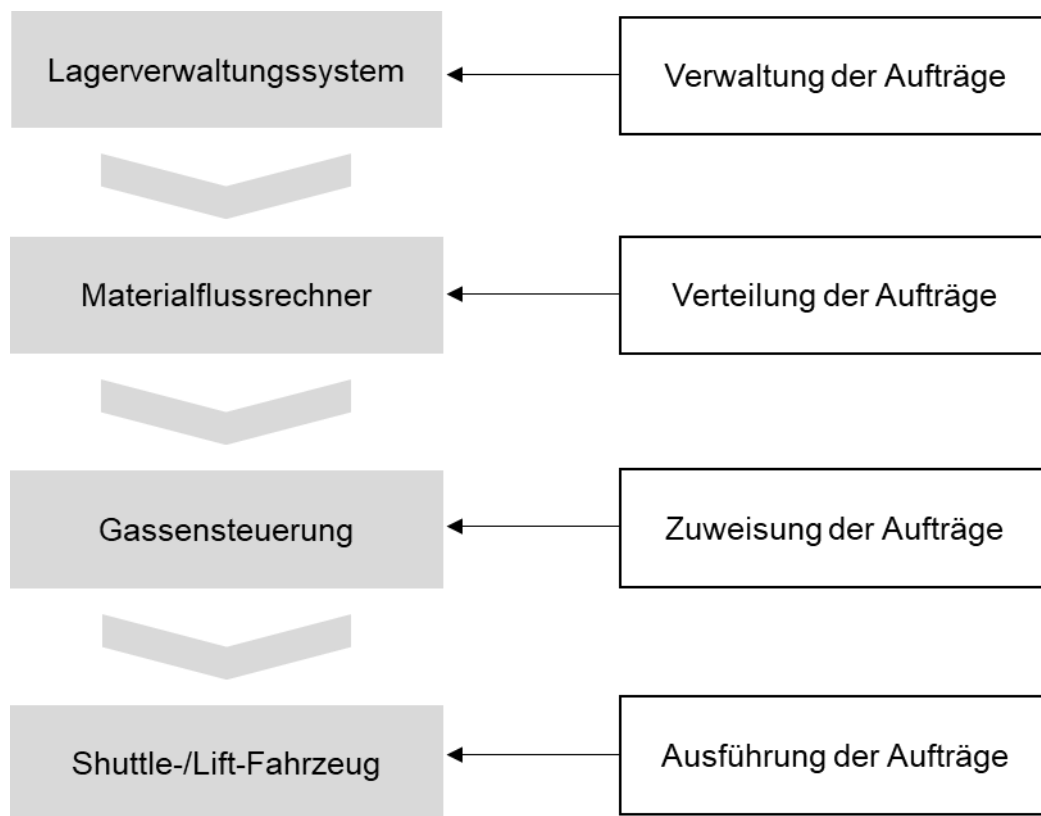


Abbildung 2-4: Steuerungsverfahren von Shuttle-Systemen in der Praxis

## 2.2 Multi-Server-Systeme

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

### 2.2.1 Krane

Während Portalkrane für die Be- und Entladung von Containerschiffen eingesetzt werden, finden sich Brückenkranen in Industriegebäuden für innerbetriebliche Schwertransporte. Durch den Einsatz von mehr als einem Portal- oder Brückenkran pro Schiene

können beide Anwendungen als Multi-Server-System ausgeführt sein (Abbildung 2-5). Daraufhin existieren in der Fachliteratur zahlreiche Lösungsansätze für das sogenannte *Crane Scheduling Problem (CSP)*. Darin wird festgelegt, welcher von mehreren Kranen zu welcher Zeit einen Transportauftrag ausführt [Kem-2011]. Das CSP ist np-schwer 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 von Brückenkränen vor [Ge-2012]. Ebenso entwickeln *Peterson et al.* eine Blocksequenzierung, die mithilfe eines Lösungsbaumes den optimalen Ablaufplan identifiziert [Pet-2014].

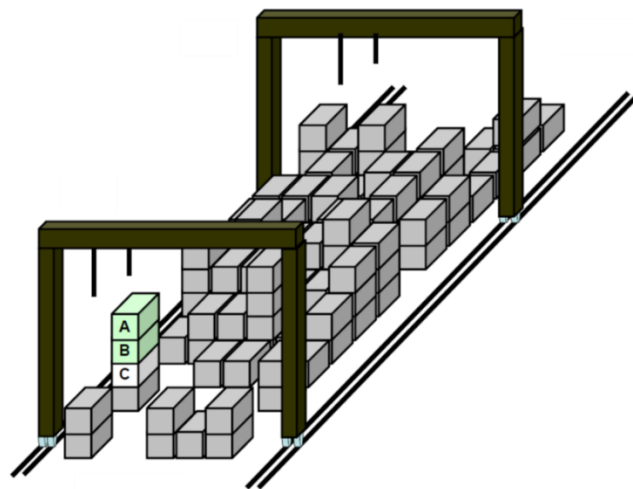


Abbildung 2-5: Zwei Portalkrane auf derselben Führungsschiene nach [Del-2009]

### 2.2.2 Aufzüge

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].

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].

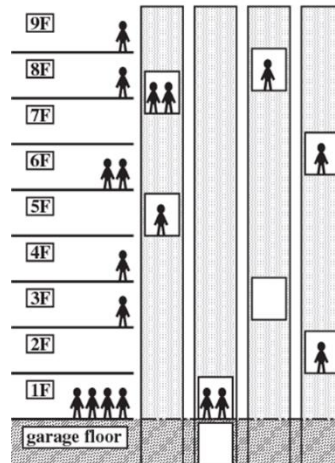


Abbildung 2-6: Mehrere Aufzugskabinen je Schacht nach [Tan-2009]

### 2.2.3 Roboter

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



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

### 2.2.4 Regalbediengeräte

Außerdem 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]

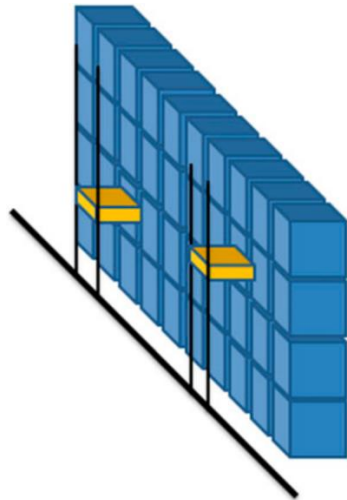


Abbildung 2-8: Zwei Regalbediengeräte auf einer gemeinsamen Schiene [Kun-2014]

### 2.2.5 Züge

Im Bahnverkehr kommt zur Sicherung der Gleise eine Reservierungsstrategie zum Einsatz. Bei diesem Verfahren wird die Bahnstrecke in Abschnitte unterteilt, die zu jedem Zeitpunkt von nur einem Zug befahren werden dürfen. [Mas-2018]

## 2.3 Zwischenfazit und Forschungsbedarf

Der Stand der Forschung zur Auslegung und Steuerung von Shuttle-Systemen lässt sich wie folgt zusammenfassen. In der Literatur existieren zahlreiche Quellen zur 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 können die Transportprozesse oftmals durch Prioritätsregeln gesteuert werden. Eine Ausnahme bildet die Steuerung von Behälterliften mit je zwei Lift-Fahrzeugen, die von zwei Quellen untersucht wird. 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.

Der Stand der Forschung zur Auslegung und Steuerung von Multi-Server-Systemen lässt sich folgendermaßen beschreiben. In zahlreichen Quellen werden anhand verschiedenster Anwendungen Multi-Server-Systeme untersucht. So finden sich solche Systeme bei Kranen, Aufzügen, Robotern, Regalbediengeräten und Zügen. Allerdings werden bislang lediglich isolierte Systeme betrachtet. Durch die fehlende Verkettung von Multi-Server-Systemen lassen sich deren Ansätze nicht einfach 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 vorgestellt und die für das Projekt OptiMUSS 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 Freiheitsgrade der Dimensionierung von Multi-Server-Shuttle-Systemen und ihre möglichen Ausprägungen sind nachfolgend in einem morphologischen Kasten dargestellt (Tabelle 3-1).

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

### 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 Ausprägungen im Folgenden dargelegt werden.

### 3.2.1 Liftbezogene Parameter

Die liftbezogenen Parameter beschreiben die Ausprägung eines Multi-Server-Shuttle-Systems hinsichtlich der in der jeweiligen Gasse befindlichen Lifte, deren IO-Ebenen und Lift-Fahrzeuge sowie die LAM der Fahrzeuge. Die Freiheitsgrade hinsichtlich der liftbezogenen Konfiguration je Gasse und ihre möglichen Ausprägungen sind nachfolgend in einem morphologischen Kasten abgebildet (Tabelle 3-2).

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

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

### 3.2.2 Ebenenbezogene Parameter

Die ebenenbezogenen Parameter beschreiben folglich die Ebene einer Gasse der jeweiligen Systemausprägung. Dies umfasst neben den darin verfahrenen Shuttle-Fahrzeugen auch die Ausweich- und Übergabepuffer sowie die Lagertiefe. Tabelle 3-3 fasst die Freiheitsgrade hinsichtlich der ebenenbezogenen Konfiguration je Gasse und ihre Ausprägungen in einem morphologischen Kasten zusammen.

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

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

### 3.3 Steuerung

Je nach Lagerkonfiguration der Systemausprägung entstehen verschiedene Abhängigkeiten zwischen den Freiheitsgraden. Die Abhängigkeitsbeziehungen der Freiheitsgrade sind in Abbildung 3-1 dargestellt und müssen bei der Auswahl der Steuerungsstrategie im Rahmen der Auslegung berücksichtigt werden. So beeinflusst die Anzahl und Position der Lifte in der Gasse die Anzahl an eingesetzten Shuttle-Fahrzeuge je Ebene. Ausweichpuffer in der Ebene ermöglichen den Zugang zu sämtlichen Liften sowie Lagerfächern und erlauben dadurch eine flexiblere Anwendung von verschiedenen Steuerungsstrategien.

Die Anzahl und Lage der IO-Ebenen hingegen beeinflusst die Anzahl an Lift-Fahrzeugen. Ausweichpuffer im Lift erlauben wiederum den Zugang zu allen Aufnahme-, Abgabe- und Übergabeebenen durch die Lift-Fahrzeuge und wirken sich somit ebenso auf die einsetzbaren Betriebsstrategien aus.



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

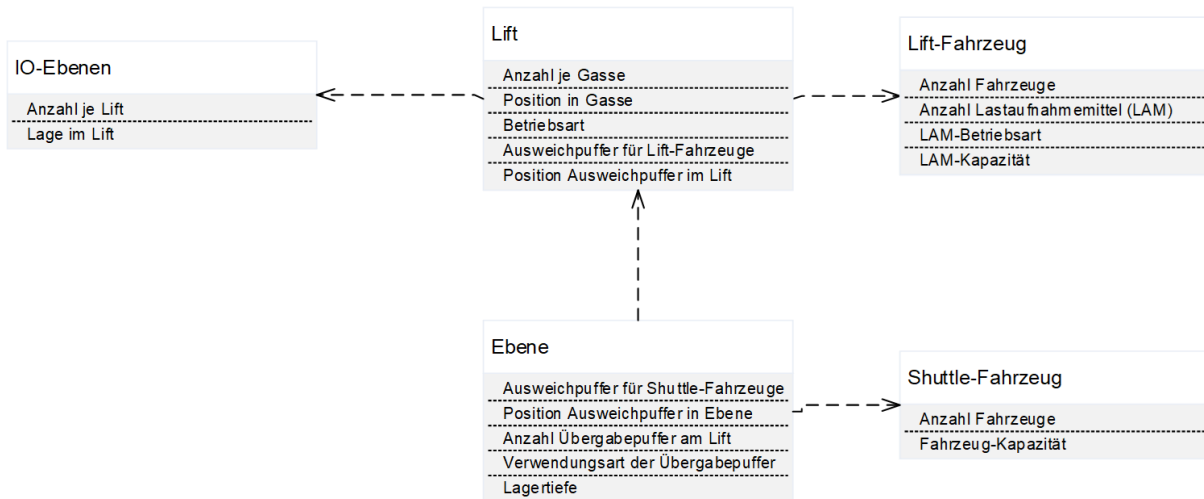


Abbildung 3-1: Abhängigkeitsbeziehungen der Freiheitsgrade

## 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.

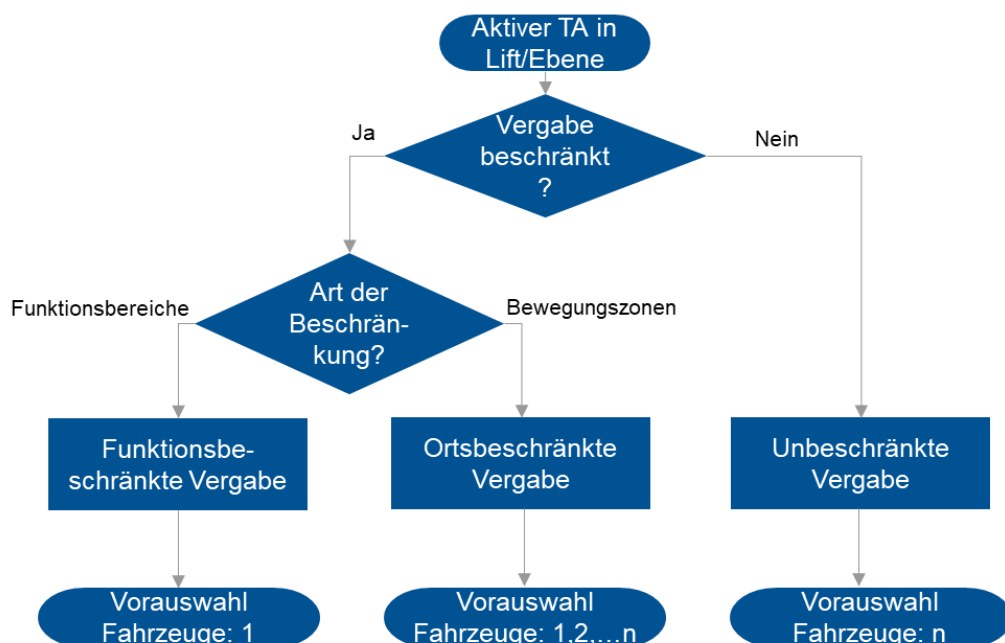


Abbildung 4-1: Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen

Beginnend mit einem aktiven Transportauftrag (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  $1...n$  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 *First Come First Served (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.

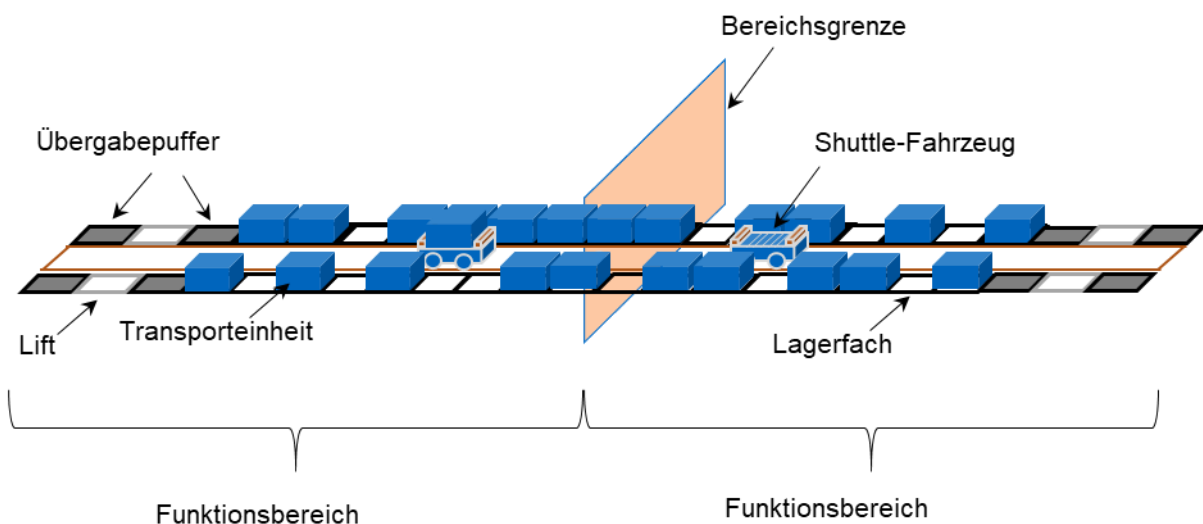


Abbildung 4-2: Funktionsbeschränkte Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen

### 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 Kollision 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, welche in Zonen unterteilt ist.

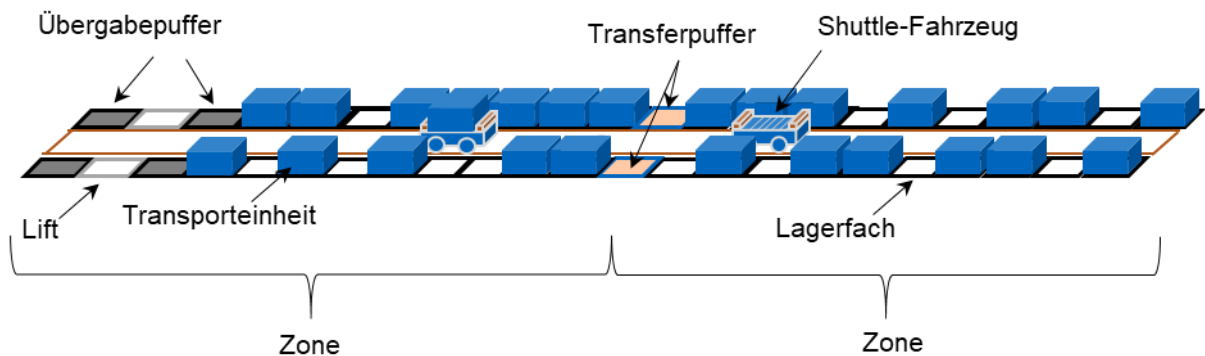


Abbildung 4-3: Ortsbeschränkte Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen

### 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.

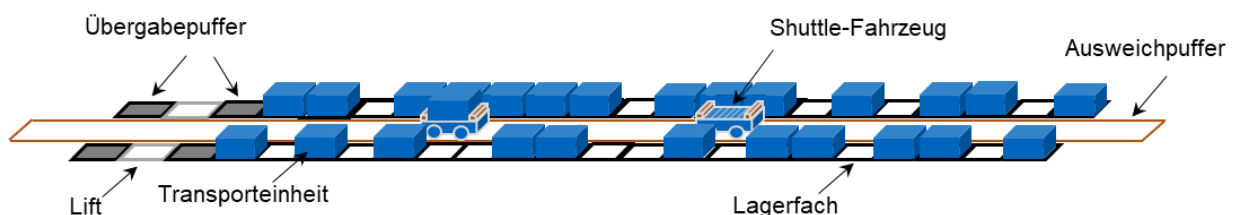


Abbildung 4-4: Unbeschränkte Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen

## 4.2 Zuordnung von Aufträgen

In der Auftragszuordnung werden die Transportaufträge den einzelnen Lift- und Shuttle-Fahrzeugen zugeteilt. Abbildung 4-5 zeigt die verschiedenen Zuordnungsarten in Abhängigkeit 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.

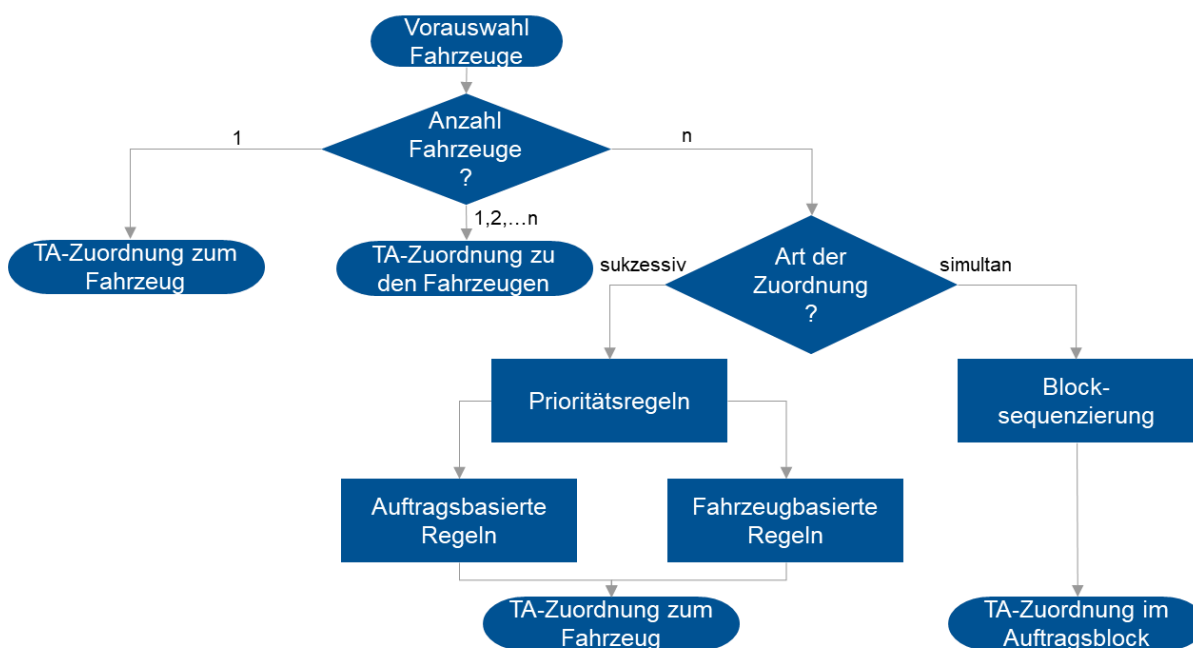


Abbildung 4-5: Auftragszuordnung in Multi-Server-Shuttle-Systemen

### 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 Vehicle (RV)

Dem Auftrag wird bei Verwendung dieser Prioritätsregel zufällig ein Fahrzeug zugewiesen. Es werden keine weiteren Kriterien beachtet.

#### Nearest Vehicle First (NVF)

Bei dieser Strategie ist die Distanz eines jeden Fahrzeugs zum Ort, an dem das Fahrzeug den Auftrag beginnen muss, relevant. Werden nur die freien, sofort 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:

$$d_j = \min_{\forall i} \{d_i\} \quad (4-1)$$

### Least Utilized Vehicle (LUV)

Bei Anwendung dieser Strategie wird das Fahrzeug ausgewählt, welches zum momentanen Zeitpunkt die geringste Auslastung vorweist. Die Auslastung wird über die gesamte *Idle*-Zeit  $I_i$  der Fahrzeuge  $i$  gemessen. Die *Idle*-Zeit bezeichnet dabei die Zeitspanne, in welcher dem Fahrzeug kein Auftrag zugewiesen war. Das Fahrzeug  $j$ , das in Summe die längste *Idle*-Zeit  $I_j$  verzeichnet, wird für den Auftrag ausgewählt:

$$I_j = \min_{\forall i} \{I_i\} \quad (4-2)$$

### Longest Idle Vehicle (LIV)

Bei dieser Strategie werden vorrangig Fahrzeuge ausgewählt, die momentan frei verfügbar sind. Falls ein oder mehrere Fahrzeuge im Zustand „*Idle*“ existieren, wird aus dieser Menge das Fahrzeug  $j$  ausgewählt, welches die längste aktuelle *Idle*-Zeit  $t_j$  aufweist:

$$t_j = \max_{\forall i} \{t_i\} \quad (4-3)$$

mit

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

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

### Nearest Vehicle First with Idle Priority

Diese Strategie ist eine modifizierte Variante der NVF Strategie, die es zum Ziel hat, neben der Streckenminimierung eine gleichmäßigere Auslastung der Fahrzeuge zu erreichen. Dabei werden in einem ersten Schritt nur die Fahrzeuge, welche momentan frei verfügbar („*Idle*“) sind, in Betracht gezogen und aus dieser Menge das mit geringster Distanz ausgewählt.

### **Nearest Vehicle First with Task Maximum**

Auch diese Strategie ist eine Modifikation der NVF Strategie und hat ebenfalls das Ziel, die Auslastung der Fahrzeuge gleichmäßiger zu gestalten. Bei dieser Strategie wird das über ein im Voraus bestimmtes Auftragsmaximum  $A_{max}$  pro Fahrzeug gesteuert. Hat das über die NVF Strategie ausgewählte Fahrzeug  $j$  bereits  $A_j$  Aufträge zugewiesen und gilt

$$A_j \geq A_{max} \quad (4-5)$$

wird dieses Fahrzeug aus der Auswahlmenge entfernt und aus der verkleinerten Menge erneut das mit der kürzesten Distanz gesucht.

#### **4.2.2 Simultane Zuordnung**

Im Rahmen 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 Auftragszuordnung 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 Auftragsblockes 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.

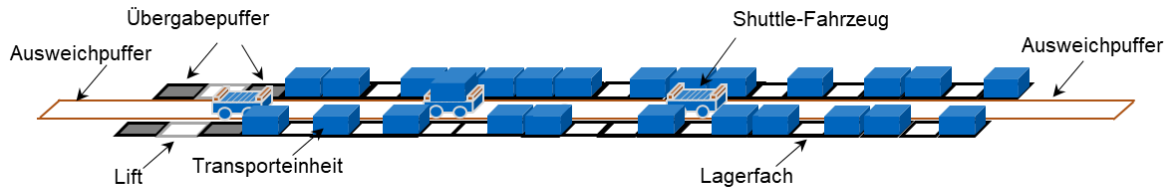


Abbildung 4-6: Auftragszuordnung in Multi-Server-Shuttle-Systemen

### 4.3 Ausführung von Aufträgen

Um Kollisionen und Blockaden zwischen Fahrzeugen zu vermeiden, werden Steuerungsstrategien zur Auftragsausführung entwickelt. Diese kann 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 nur einem Fahrzeug gleichzeitig befahren werden. Das Befahren ist nur nach vorherigem Reservieren des Blocks möglich. Abbildung 4-7 stellt beispielhaft die Unterteilung der Fahrschiene einer Ebene in Blöcken dar.

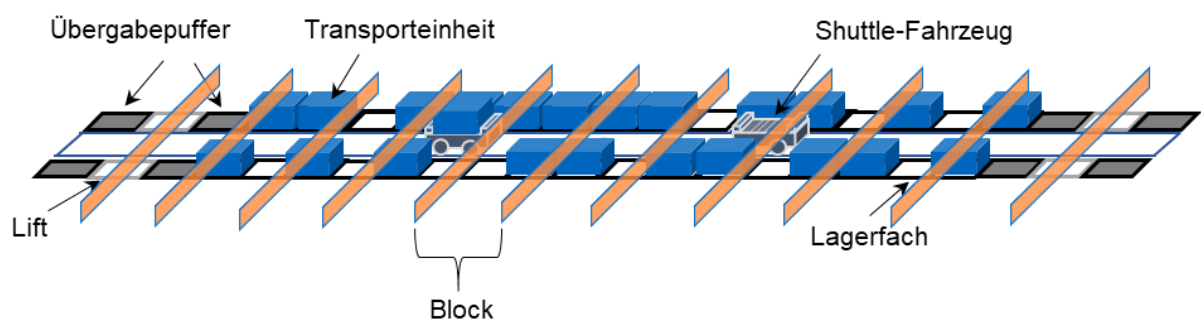


Abbildung 4-7: Ausführungssteuerung mittels Blockreservierung

#### 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 relevante Zielposition näher liegt (Abbildung 4-8).



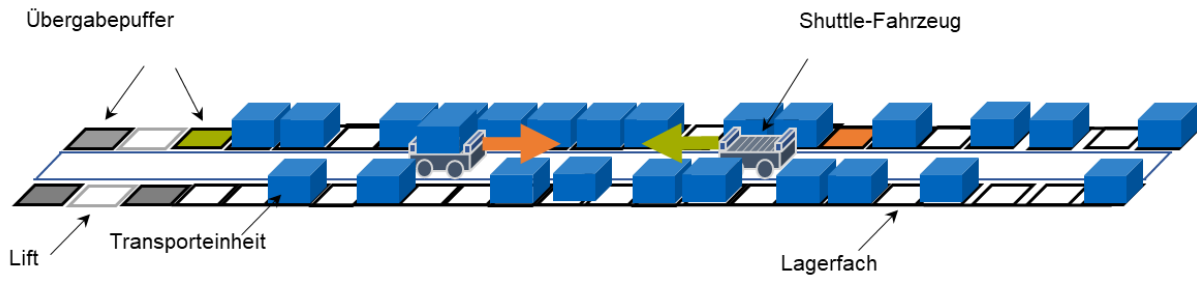


Abbildung 4-8: Ausführungssteuerung mittels Abstandsregelung

## 5 Modellierung und Implementierung eines Simulationsmodells

In diesem Kapitel wird die Modellierung der Systemkomponenten, Fahrzeugdynamik und Lagerprozesse eines Multi-Server-Shuttle-Systems beschrieben. Anschließend 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 und lagern Transporteinheiten in die Lagerfächer ein. Im Lift verfahren Lift-Fahrzeuge entlang eines Schachts und bedienen die Zu- und Abführung der Transporteinheiten. Dabei sind Ebenen und Lifte grundsätzlich durch Übergabepuffer miteinander verkettet. Abbildung 5-1 stellt den modularen Aufbau eines Shuttle-Systems aus den Systemkomponenten hierarchisch dar.

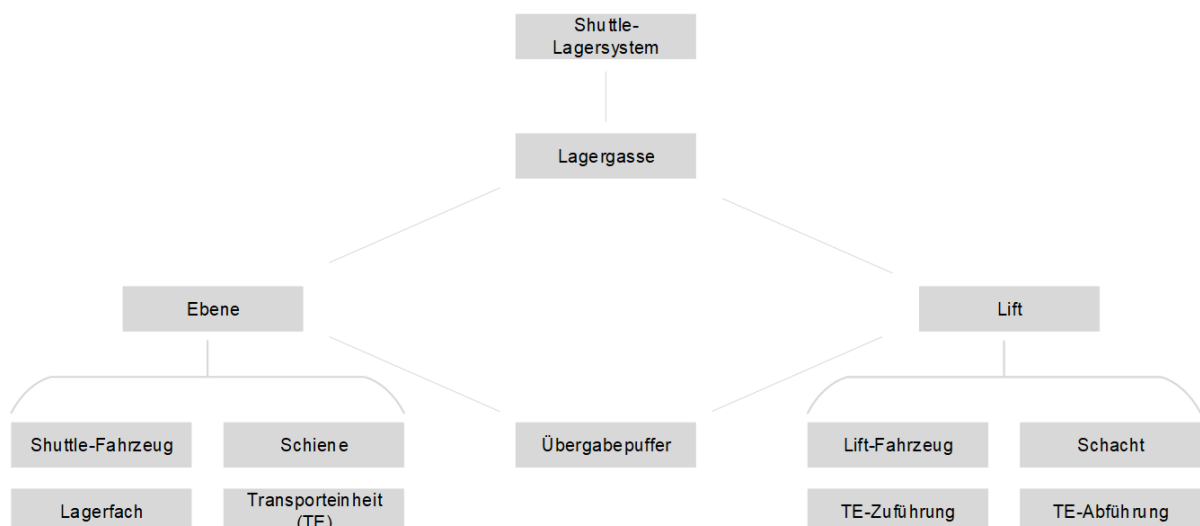


Abbildung 5-1: Modularer Aufbau eines Shuttle-Systems

#### 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 Transporteinheiten in und aus den Lagerfächern durch. In jeder Ebene befinden sich Übergabepuffer, welche die Verknüpfung zu einem Lift darstellen.

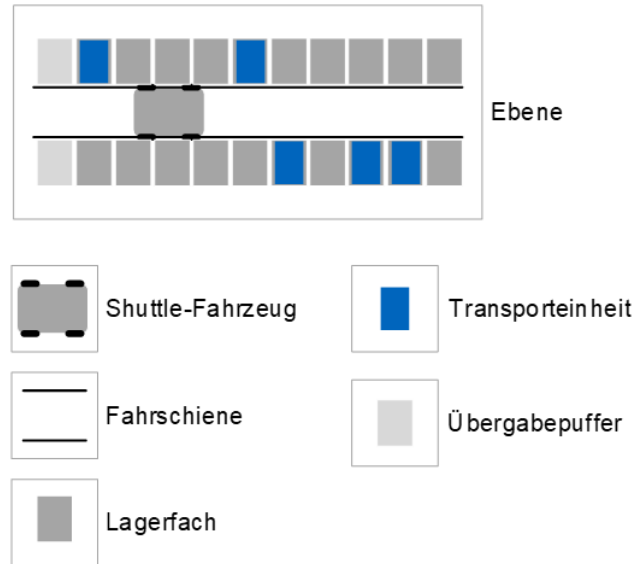


Abbildung 5-2: Modellierung einer Ebene in einem Shuttle-System

### 5.1.2 Lift

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

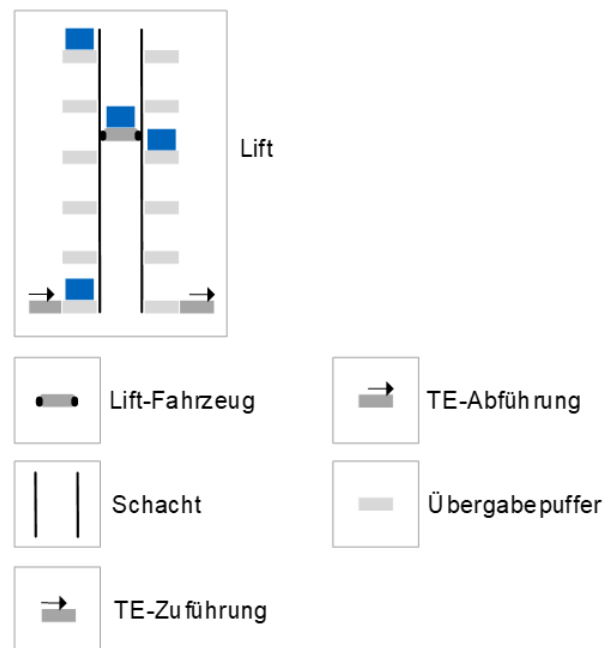


Abbildung 5-3: Modellierung eines Lifts in einem Shuttle-System

## 5.2 Modellierung der Fahrzeugdynamik

Zur Durchführung von Transportaufträgen verfahren die Shuttle- und Lift-Fahrzeuge entlang der jeweiligen Schiene. 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:

$$s_{tot} \geq s_{acc} + s_{dec} \quad (0-1)$$

$$s_{acc/dec} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{max}^2}{a_{acc/dec}} \quad (0-2)$$

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 wie folgt berechnet:

$$v = \sqrt{2 \cdot s_{tot} \cdot \frac{a_{acc} \cdot a_{dec}}{a_{acc} + a_{dec}}} \quad (0-3)$$

Die Geschwindigkeits-Zeit-Diagramme sind für beide Fälle in Abbildung 5-4 dargestellt.

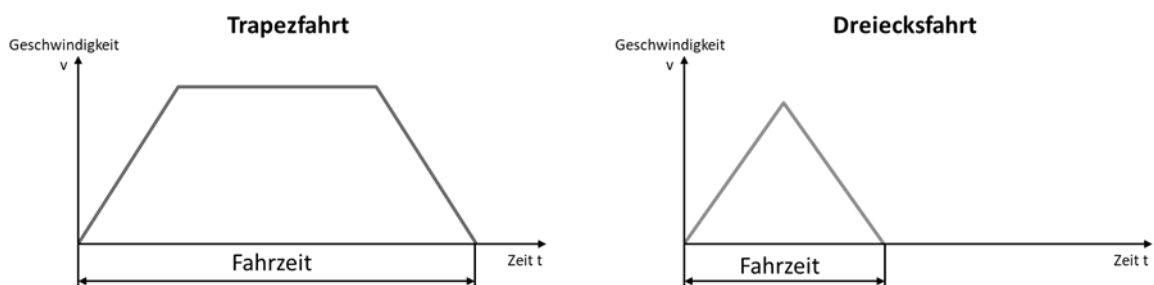


Abbildung 5-4:  $v$ - $t$ -Diagramm einer Trapez- und Dreiecksfahrt für  $a_{acc} = a_{dec}$

## 5.3 Modellierung der Lagerprozesse

Für die Modellierung eines Shuttle-Systems ist die Modellierung sämtlicher darin ablaufender Lagerprozesse notwendig. Diese gliedern sich in Ein-, Aus-, sowie Umlagerung und werden nachfolgend erläutert.

### 5.3.1 Einlagerung

Bei einer Einlagerung wird die Transporteinheit über die TE-Zuführung dem Shuttle-System zugeführt und anschließend auf den Übergabepuffer befördert. Von dort übernimmt ein Lift-Fahrzeug, welches die Transporteinheit auf die entsprechende Ebene transportiert und auf den Übergabepuffer ablegt. Daraufhin transportiert das Shuttle-Fahrzeug die Transporteinheit in das Lagerfach. Der Einlagerungsprozess ist schematisch in Abbildung 5-5 dargestellt.

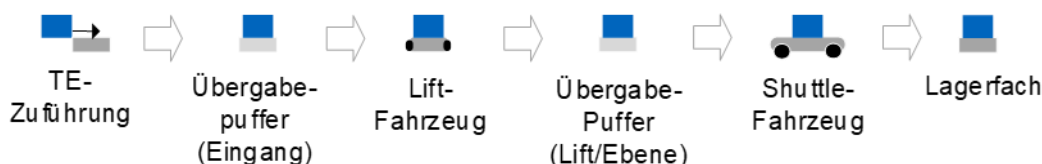


Abbildung 5-5: Einlagerungsprozess einer Transporteinheit

### 5.3.2 Auslagerung

Die Auslagerung startet am Lagerfach mit dem Abtransport der Transporteinheit auf den Übergabepuffer durch das Shuttle-Fahrzeug. Von dort wird die Transporteinheit 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 den Auslagerungsprozess schematisch dar.

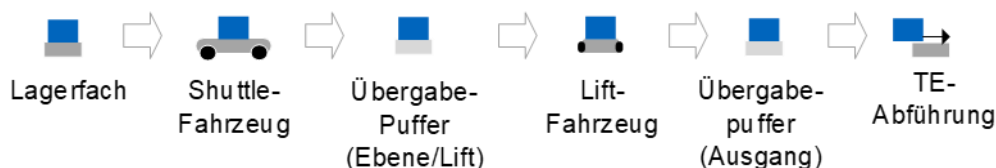


Abbildung 5-6: Auslagerungsprozess einer Transporteinheit

### 5.3.3 Umlagerung

Bei mehrfachtiefer Lagerung werden im Falle der Blockierung einer Transporteinheit durch einen weiteren Behälter Umlagerung durchgeführt. Diese beschreiben eine Aufnahme der blockierenden Transporteinheit durch das Shuttle-Fahrzeug mit anschließender Abgabe in ein alternatives Lagerfach (Abbildung 5-7).



Abbildung 5-7: Umlagerungsprozess einer Transporteinheit

## 5.4 Implementierung des Simulationsmodells

Für die Durchsatzanalyse von unterschiedlichen Ausprägungen und Steuerungen 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.

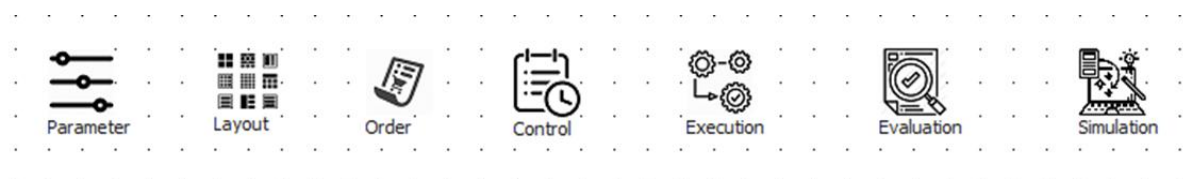


Abbildung 5-8: Funktionsmodule des Simulationsmodells

#### 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 Ebenenhöhe, Lagerplätze und Behälter
- Abmessungen innerhalb des Lifts, wie 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.

### 5.4.1 Systemkomponenten

Gemäß der Modellierung werden 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 Shuttle-System mit zehn Ebenen und hebt die Struktur einer Ebene hervor.

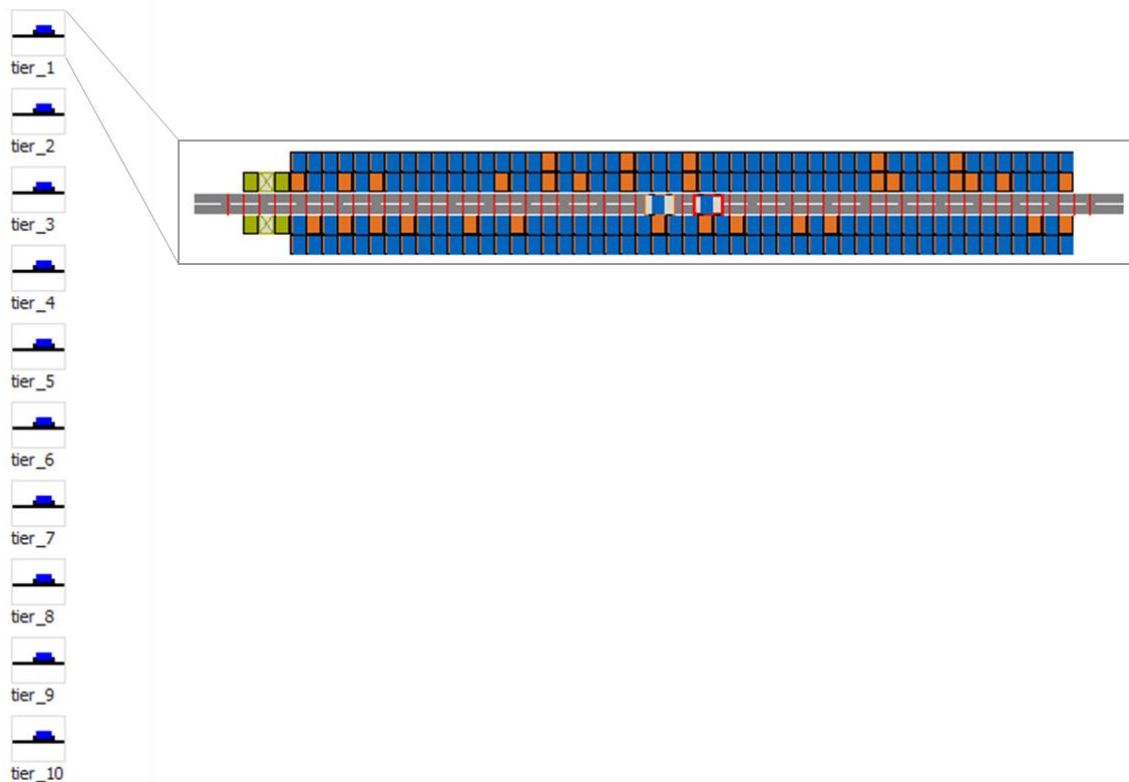


Abbildung 5-9: Simulationsmodell eines Multi-Server-Shuttle-Systems mit zehn Ebenen

#### Lift

Ein Lift wird ebenso als *Netzwerk* umgesetzt, dessen Bestandteile die Systemkomponenten eines Behälterlifts aufweisen. Abbildung 5-10 stellt beispielhaft ein Shuttle-System mit zwei Behälterliften dar.



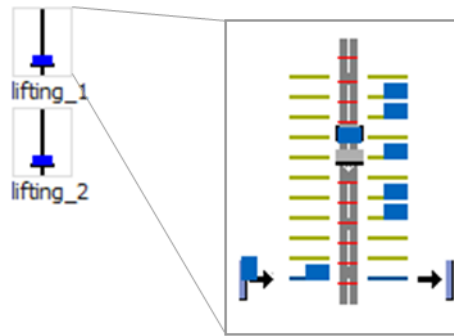


Abbildung 5-10: Simulationsmodell eines Multi-Server-Shuttle-Systems mit zwei Liften

### 5.4.2 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:

$$s_{vmax} = \frac{v_{max}^2}{2 \cdot a_{dec}} \quad (0-4)$$

Bei einer Dreiecksfahrt hingegen kann der Bremsweg folgendermaßen bestimmt werden:

$$s_v = \frac{v^2}{2 \cdot a_{dec}} \quad (0-5)$$

### 5.4.3 Lagerprozesse

Die Durchführung von Transportaufträgen (TA) in der Gasse startet mit einer Prüfung des jeweiligen Lagerprozesses. Bei einer Einlagerung wird der TA zunächst im Lift aktiviert und einem Lift-Fahrzeug zugewiesen. Nach der Auftragsausführung wird der TA in der jeweiligen Ebene aktiviert und wiederum einem Shuttle-Fahrzeug zugewiesen. Sobald der Auftrag 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. Die Durchführungsprozess ist in Abbildung 5-11 dargestellt.

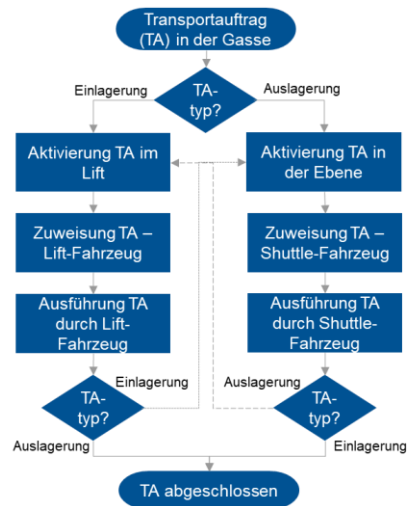


Abbildung 5-11: Auftragsdurchführung im Multi-Server-Shuttle-System



## 6 Durchführung von Parameterstudien

Dieses Kapitel umfasst die Parameterstudien zur simulationsbasierten Untersuchung von Multi-Server-Shuttle-Systemen. Es werden zunächst die Eingabe- und Ausgabeparameter beschrieben, welche im Rahmen der Simulationsstudien variiert und aufgenommen werden. Daran schließt sich die Beschreibung der Vorstudien zu simulationspezifischen Analysen sowie der Hauptstudie zur Untersuchung der Forschungshypothese an. Schließlich werden die Einzelstudien erläutert und damit einzelne Zusammenhänge zwischen den Freiheitsgraden und den erzielbaren Durchsatz verdeutlicht

### 6.1 Eingabe- und Ausgabeparameter

Das Simulationsmodell beinhaltet einerseits Einstellgrößen, durch welche sich die Ausprägungen eines Multi-Server-Shuttle-Systems erstellen lassen. Demnach werden die Parameter zur Dimensionierung (Gassenlänge sowie -höhe) und zur Konfiguration des Lagersystems (IO-Punkte, Lifte, kinematische Parameter der Fahrzeuge sowie Lagertiefe und -füllgrad) definiert. Andererseits wird in den Simulationsläufen eine Vielzahl von Messgrößen aufgenommen, die eine Analyse hinsichtlich der relevanten Kenngrößen ermöglichen. Neben der Durchsatzleistung einer Gasse werden die Wartezeiten, Wegstrecken, Auslastungen und Anzahl der Doppelspiele der Fahrzeuge bestimmt. Des Weiteren wird der Lagerfüllgrad der Ebenen sowie die Belegungszeiten der Übergabepuffer gespeichert. Es werden die Durchlaufzeiten der Aufträge berechnet und die zeitliche Verteilung der ein- und ausgehenden Behälter betrachtet.

Die im Simulationsmodell betrachteten Eingabe- und Ausgabeparameter sind Tabelle 6-1 zu entnehmen.

Tabelle 6-1: Betrachtete Eingabe- und Ausgabeparameter

Einstellgrößen (Eingabe)	Messgrößen (Ausgabe)
Länge der Gasse	Durchsatz der Gasse
Anzahl der Ebenen	Wartezeiten der Fahrzeuge
Anzahl und Lage der IO-Punkte	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 Vorstudien

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 ein Multi-Server-Shuttle-System mit folgender Ausprägung betrachtet. Das System entspricht einer Gasse mit einer Länge von 50 m und 15 Ebenen. An der Stirnseite der Gasse sind zwei Behälterlifte angeordnet, die im Einzelspiel (Ein- oder Auslagerung) betrieben werden. In beiden Liften befindet sich die eine IO-Ebene unten. Die Lagerung erfolgt doppeltief mit einem Lagerfüllgrad von 85 %.

### 6.2.1 Simulationszeit

Zur Bestimmung der notwendigen Simulationszeit der Parameterstudien wird im Rahmen einer Voruntersuchung die Abweichung der Durchsatzleistung in Abhängigkeit 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 4 h unter 5 % liegt, welches nach Absprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses eine hinreichend genaue Ermittlung darstellt.

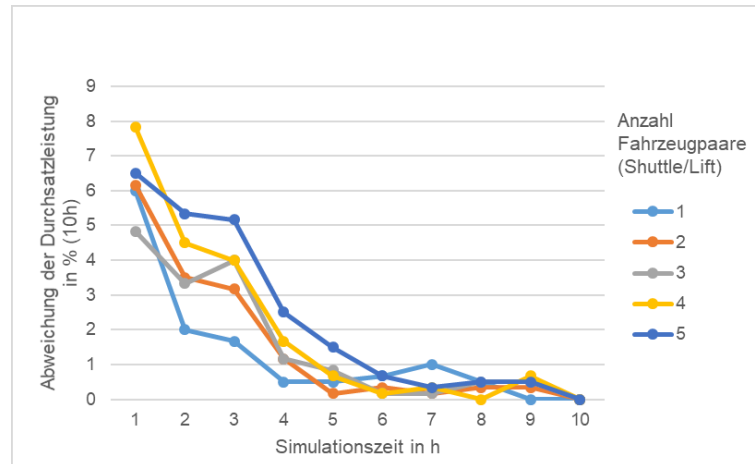


Abbildung 6-1: Abweichung der Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Simulationszeit und Fahrzeuganzahl (Referenz: 10 h)

### 6.3 Ein- und Ausschwingphase

Um eine Verfälschung der Simulationsergebnisse zu vermeiden, werden die Ein- und Ausschwingphase in den Simulationsläufen herausgerechnet. Dabei wird die Einschwingphase (Warm-Up) beendet, wenn die Änderung des gleitenden Mittelwerts der abgeschlossenen Aufträge < 10 % beträgt (Abbildung 6-2).

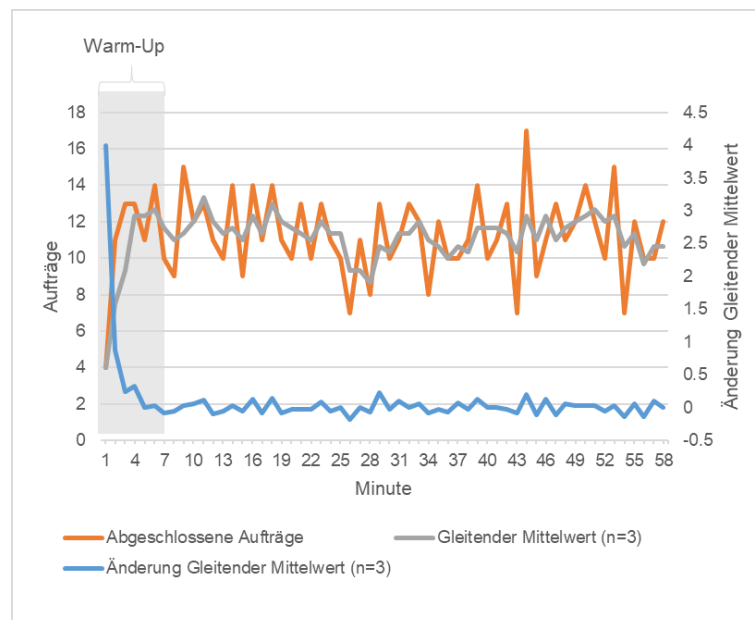


Abbildung 6-2: Identifikation der Warm-Up Phase über die Anzahl abgeschlossener Aufträge je Minute

## 6.4 Hauptstudie

In der Hauptstudie der Parameterstudien wird die Forschungshypothese überprüft und die Leistungsfähigkeit der Steuerungsstrategien in einer breit gefächerten Auswahl an Systemkonfigurationen analysiert.

### 6.4.1 Überprüfung der Forschungshypothese

Abbildung 6-3 zeigt die Durchsatzleistung eines Shuttle-Systems in Abhängigkeit der Anzahl an Ebenen in der Gasse mit zwei stirnseitig angeordneten Behälterliften und dem Einsatz von einem Lift-Fahrzeug je Lift und einem Shuttle-Fahrzeug je Ebene. Mit steigender Anzahl an Ebenen sinkt die Auslastung des Shuttle-Fahrzeugs und steigt hingegen die Auslastung des Lift-Fahrzeugs. Somit kann festgestellt werden, dass in einer niedrigen Gasse das Shuttle-Fahrzeug den Durchsatz begrenzt, wohingegen in einer hohen Gasse das Lift-Fahrzeug der begrenzende Faktor ist.

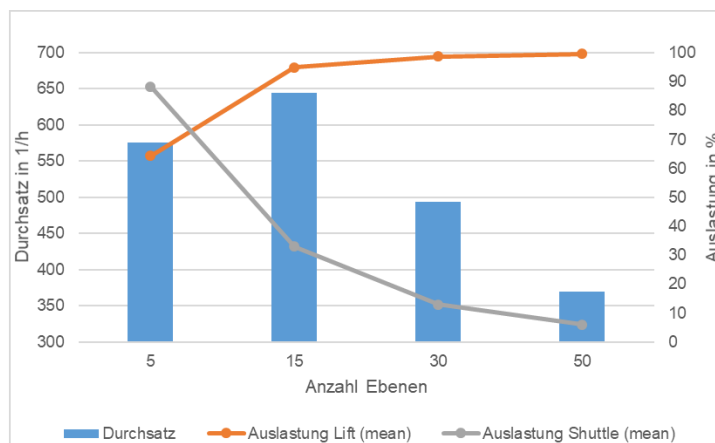


Abbildung 6-3: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Anzahl an Ebenen in der Gasse

Abbildung 6-4 stellt die Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Anzahl an Ebenen und Shuttle-Fahrzeuge dar. Es wird ein Lift-Fahrzeug je Lift eingesetzt. So zeigt sich, dass in einer niedrigen Gasse (< 15 Ebenen) der Durchsatz durch den Einsatz mehrerer Shuttle-Fahrzeuge erhöht werden kann.

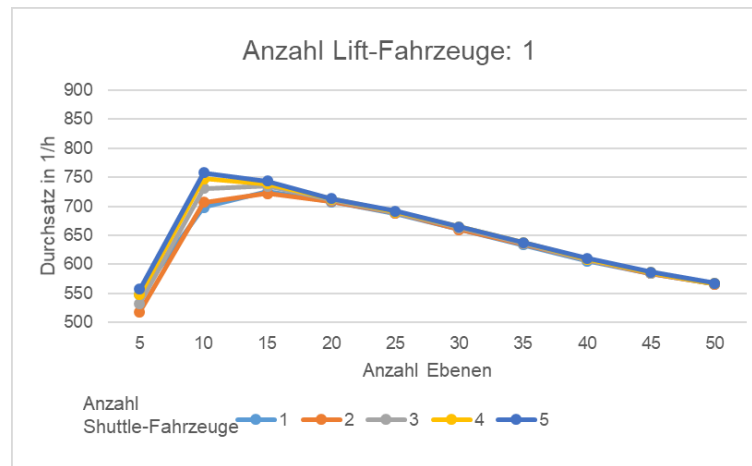


Abbildung 6-4: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Anzahl an Ebenen und Shuttle-Fahrzeuge

In Abbildung 6-5 ist die erzielbare Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Anzahl Ebenen und Lift-Fahrzeuge dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Systemausprägung mit zwei stirnseitig angeordneten Behälterliften und einem Shuttle-Fahrzeug je Ebene. Die Durchsatz-Kennlinien zeigen auf, dass insbesondere in einer hohen Gasse (> 10 Ebenen) der Durchsatz durch den Einsatz mehrerer Lift-Fahrzeuge erhöht werden kann.

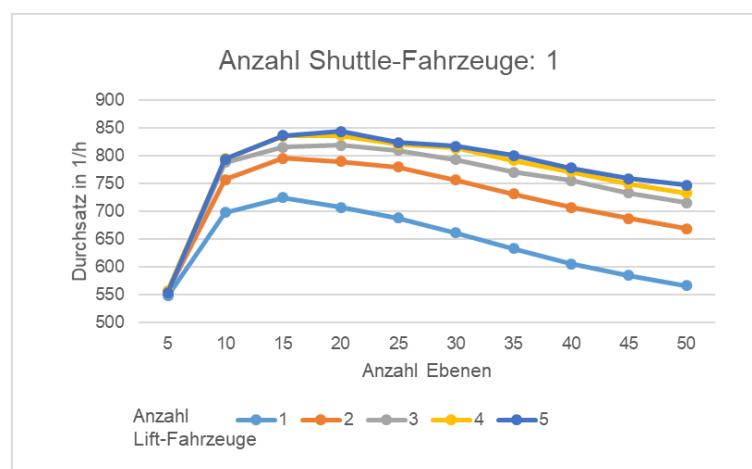


Abbildung 6-5: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Anzahl an Ebenen und Lift-Fahrzeuge

Schließlich wird die Durchsatzleistung unter Variation von sowohl Shuttle- als auch Lift-Fahrzeugen analysiert. Aus Abbildung 6-6 kann abgeleitet werden, dass durch den Einsatz von mehreren Lift- und Shuttle-Fahrzeugen der Durchsatz einer Gasse gesteigert werden kann.



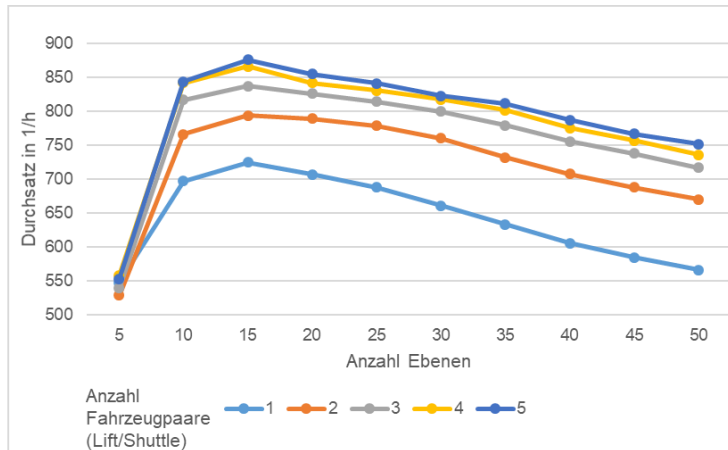


Abbildung 6-6: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Anzahl an Ebenen und Fahrzeugpaare (Lift/Shuttle)

### 6.4.2 Experimentdesign

Im Rahmen der statistischen Versuchsplanung wird ein Testplan entwickelt, welcher sich aus Grund- und Einzelkonfigurationen zusammensetzt. Während die verschiedenen Kombinationen der Steuerungsparameter als Grundkonfigurationen einfließen, werden die Konfigurationsparameter mithilfe des Latin Hypercube Verfahrens kombiniert und somit ein gleichverteiltes sowie symmetrisches Testfeld erzeugt (siehe Abbildung 6-7).

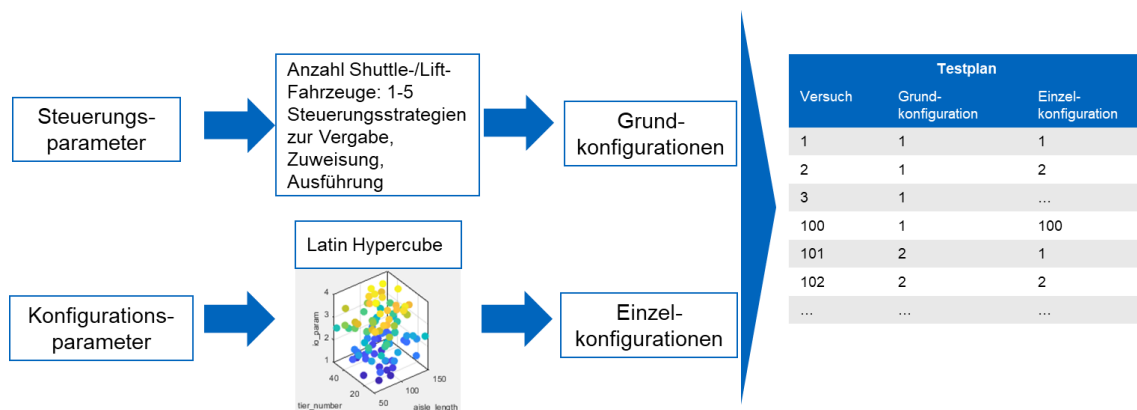


Abbildung 6-7: Erstellung des Testplans

Die Einzelkonfigurationen werden auf Basis der in Tabelle 6-2 aufgelisteten Parameterräume generiert.

Tabelle 6-2: Betrachtete Parameterräume der Einzelkonfigurationen

Parameter	Min	Max	Einheit	Kommentar
Gassenlänge	50	150	M	

Anzahl der Ebenen	10	50	-	
Anzahl der IO-Ebenen	1	3	-	
Lage der IO-Ebenen	1	3	-	1: unten, 2: mitte, 3: oben
Anzahl der Lifte	1	6	-	
Position der Lifte	1	3	-	1: vorne, 2: mitte, 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	%	

### 6.4.3 Betrachtungen zur Durchsatzleistung

Abbildung 6-8 zeigt die Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Konfiguration. Es wird die Anzahl Shuttle-Fahrzeuge (S) und die Anzahl Lift-Fahrzeuge (L) jeweils von 1-3 variiert. Demnach ist die Durchsatzleistung der rot markierten Single-Server-Shuttle-Systeme, in welchen ein Lift-Fahrzeug je Lift und ein Shuttle-Fahrzeug je Ebene eingesetzt wird, innerhalb der jeweiligen Konfiguration durchgehend am niedrigsten. Dabei sind die Leistungsunterschiede zwischen Single- und Multi-Server-Shuttle-System abhängig von der jeweiligen Konfiguration.

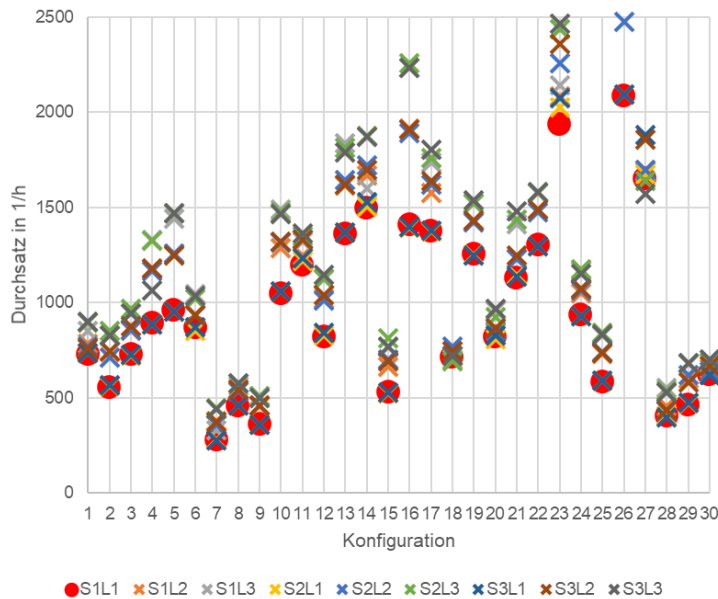


Abbildung 6-8: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Konfiguration

In Abbildung 6-9 ist die durchschnittliche Änderung der Durchsatzleistung dargestellt. In den betrachteten Konfigurationen hat die Erhöhung der Anzahl an Lift-Fahrzeugen durchschnittlich eine Steigerung der Durchsatzleistung zur Folge. Die Erhöhung der Anzahl an Shuttle-Fahrzeugen dagegen hat im Durchschnitt kaum Auswirkungen auf den Durchsatz.

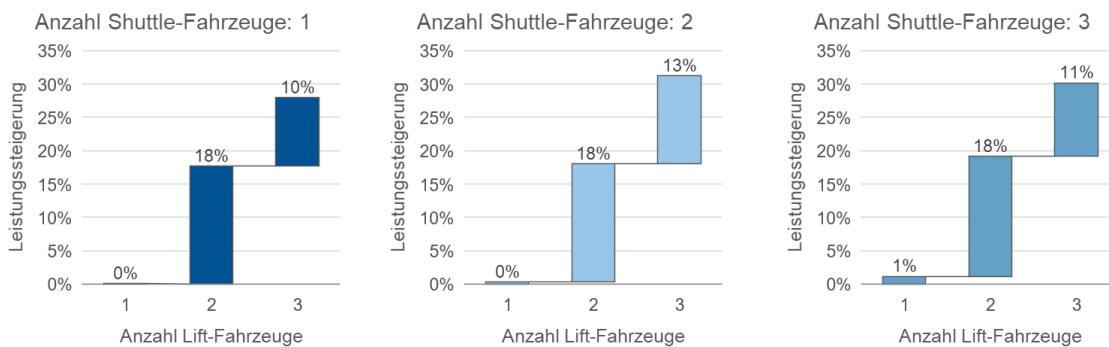


Abbildung 6-9: Durchschnittliche Änderung der Durchsatzleistung

## 6.5 Einzelstudien

### 6.5.1 Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Vergabestrategie

Abbildung 6-10 stellt die Durchsatzleistungen in den verschiedenen Vergabestrategien und unter Variation der Shuttle- und Lift-Fahrzeuge gegenüber. Es wird eine Systemausprägung mit zwei stirnseitig angeordneten Behälterliften untersucht. Die Lager-

gasse umfasst eine Länge von 50 m und 15 Ebenen. Die funktionsbeschränkte Vergabestrategie ist in dieser Ausprägung lediglich als Single-Server-System möglich. Die ortsbeschränkte Vergabe erbringt geringfügige Durchsatzsteigerungen. Die unbeschränkte Vergabe hingegen lässt den Durchsatz mit steigender Anzahl an Lift-Fahrzeugen ansteigen.

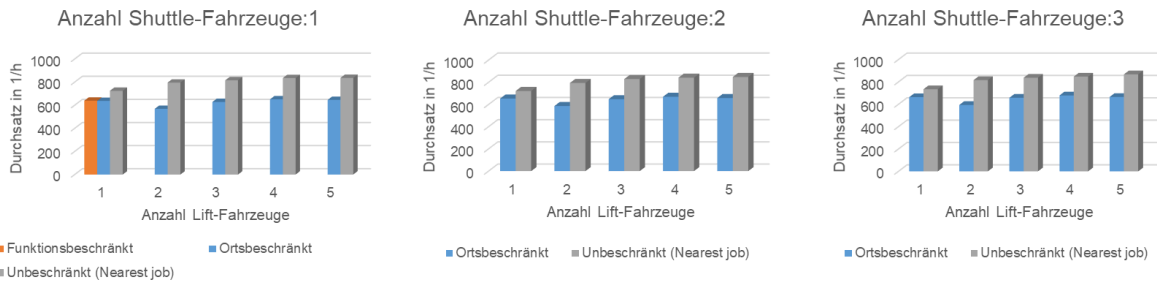


Abbildung 6-10: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Vergabestrategie

Abbildung 6-11 und Abbildung 6-12 zeigen die Durchsatzleistung bei funktionsbeschränkter Vergabe. Daraus wird ersichtlich, dass der Einsatz eines zweiten Lift-Fahrzeugs in dieser Systemausprägung den Durchsatz insbesondere bei höheren Gassen ansteigen lässt.

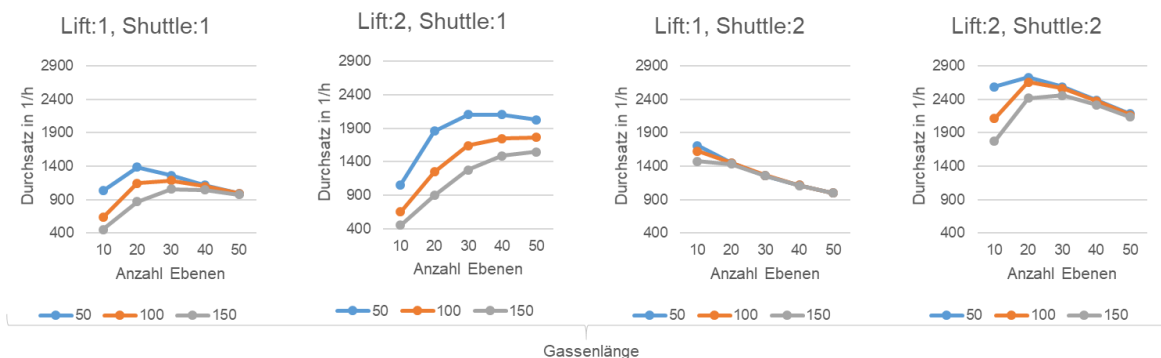


Abbildung 6-11: Durchsatzleistung anhand Vergabestrategie „funktionsbeschränkt“ und alternierender Erhöhung der Fahrzeugzahl

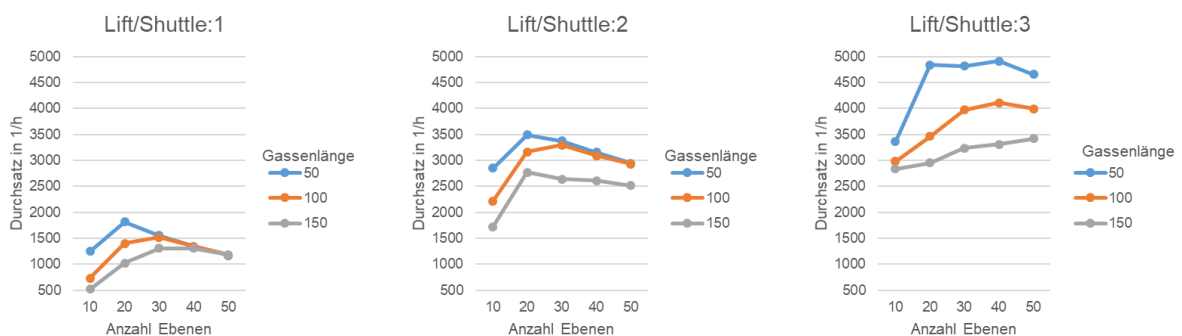


Abbildung 6-12: Durchsatzleistung anhand Vergabestrategie „funktionsbeschränkt“ und gleichmäßiger Erhöhung der Fahrzeugzahl

In Abbildung 6-13 ist die Durchsatzleistung bei ortsbeschränkter Vergabe abgebildet. Diese zeigt auf, dass sich mit steigender Gassenlänge durch den Einsatz mehrerer Shuttle-Fahrzeuge eine Durchsatzerhöhung einstellt.

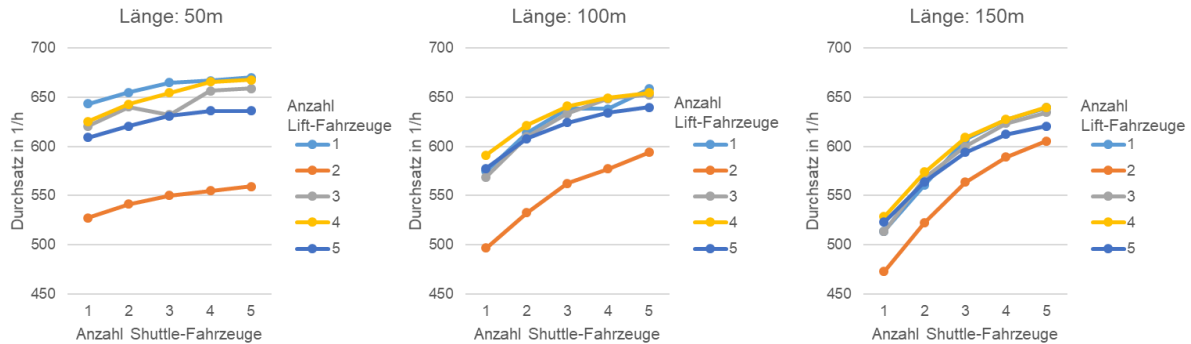


Abbildung 6-13: Durchsatzleistung anhand Vergabestrategie „ortsbeschränkt“

### 6.5.2 Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Zuordnungsstrategie

Abbildung 6-14 vergleicht die Strategien der Blockreservierung und -sequenzierung. Beide Strategien können durch Erhöhung der Anzahl an Shuttle- und Lift-Fahrzeugen den Durchsatz steigern. Die Sequenzierung erzielt durchweg den höheren Durchsatz.

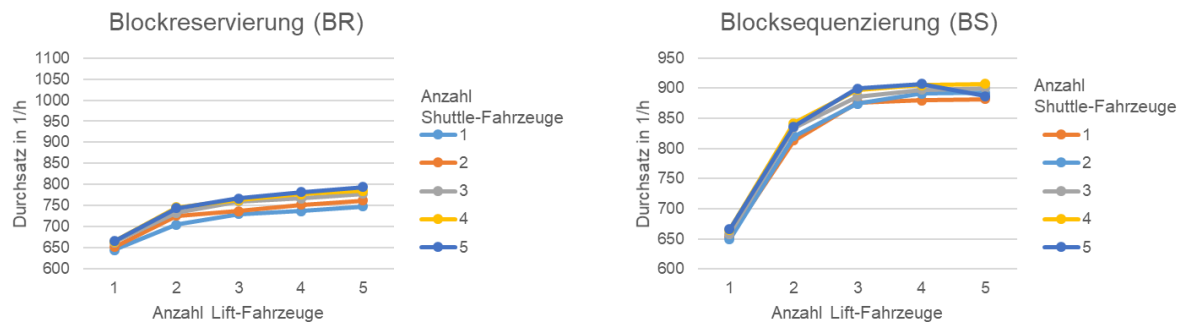


Abbildung 6-14: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Zuordnungsstrategie

### 6.5.3 Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Prioritätsregel

Abbildung 6-15, Abbildung 6-16 und Abbildung 6-17 stellen die Durchsätze der verschiedenen Prioritätsregeln gegenüber.

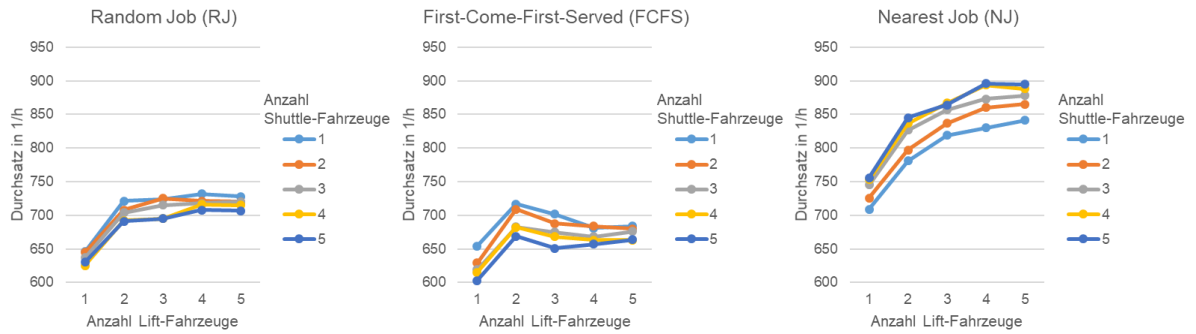


Abbildung 6-15: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Prioritätsregel (fahrzeugbasiert)

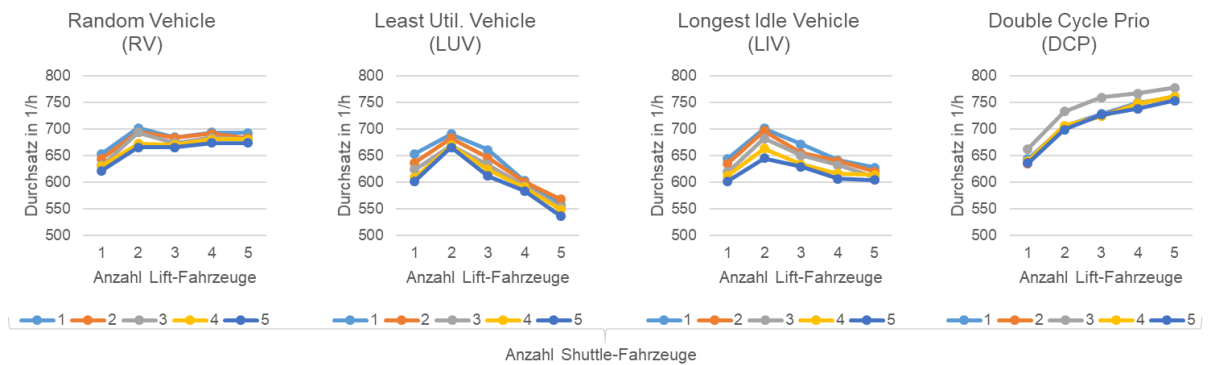


Abbildung 6-16: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Prioritätsregel (auftragsbasiert)

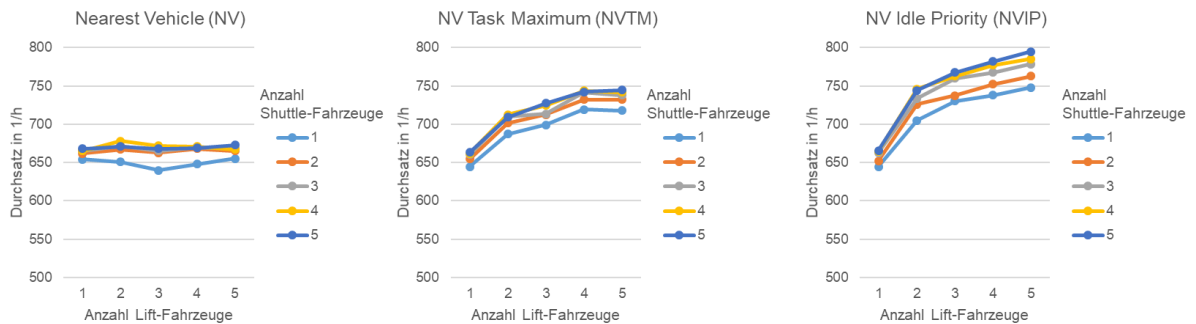


Abbildung 6-17: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Prioritätsregel (auftragsbasiert, NV)

### 6.5.4 Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Ausführungsstrategie

Abbildung 6-18 und Abbildung 6-19 stellen die Durchsätze und Durchlaufzeiten (DLZ) der beiden Ausführungsstrategien Blockreservierung und Abstandsregelung gegenüber.

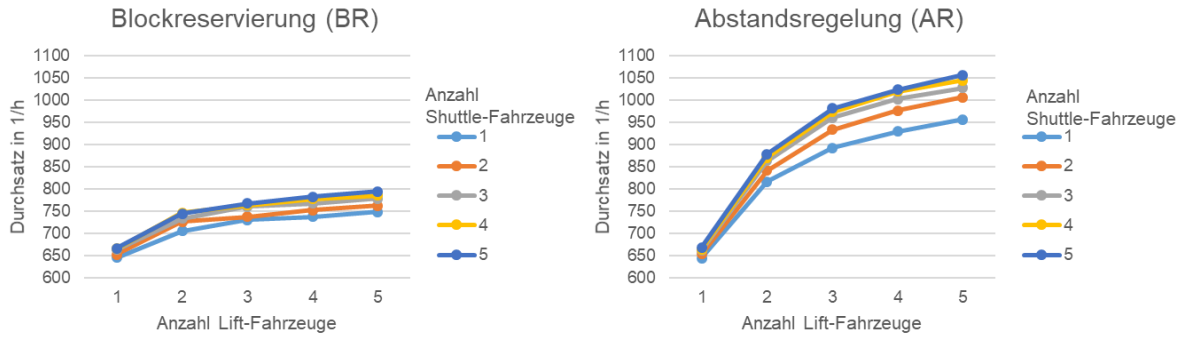


Abbildung 6-18: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Ausführungsstrategie

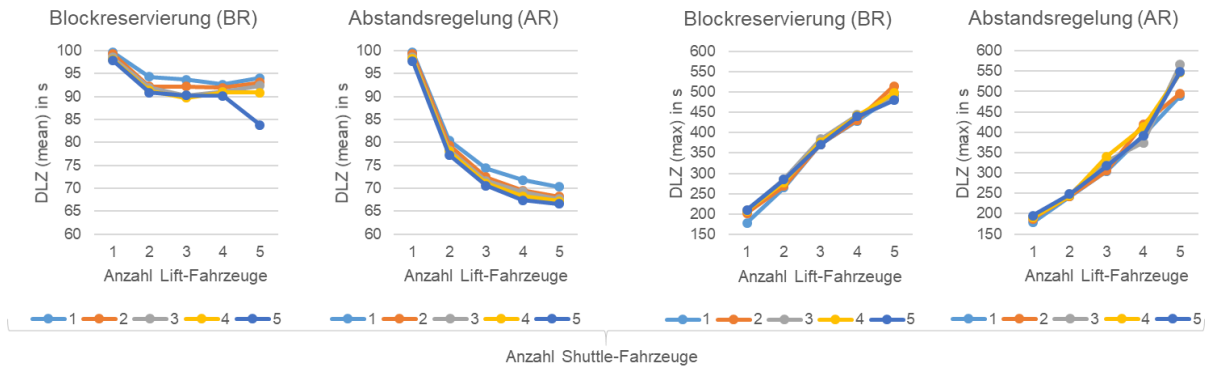


Abbildung 6-19: Durchlaufzeiten (DLZ) in Abhängigkeit der Ausführungsstrategie

## 7 Ableitung von Handlungsempfehlungen

---

In diesem Kapitel werden auf Basis der Parameterstudien die Handlungsanweisungen zur Auslegung von Multi-Server-Shuttle-Systemen beschrieben.

### 7.1 Durchsatzänderung unter Variation der Dimensionen

Im Rahmen der Auslegung von Multi-Server-Shuttle-Systemen erfolgt in einem ersten Schritt auf Basis der geforderten Anzahl an Lagerfächern die Untersuchung des erzielbaren Durchsatzes unter Variation der Gassenlänge und Gassenhöhe bzw. Anzahl an Ebenen.

Abbildung 7-1, Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3 zeigen die jeweiligen Durchsatz-Kennlinien in den verschiedenen Dimensionen. Dies wird exemplarisch anhand einer Konfiguration mit zwei stirnseitig angebrachten Liften untersucht. Die Steuerung erfolgt mittels der Blockreservierung, Abstandsregelung und ortsbeschränkter Vergabe. Daraus können für die gegebene Konfiguration folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Bei geringer Anzahl an Ebenen wirkt sich die Gassenlänge auf den Durchsatz aus.
- Durch Erhöhung der Fahrzeuganzahl wird die Durchsatzleistung gesteigert.



7 Ableitung von Handlungsempfehlungen

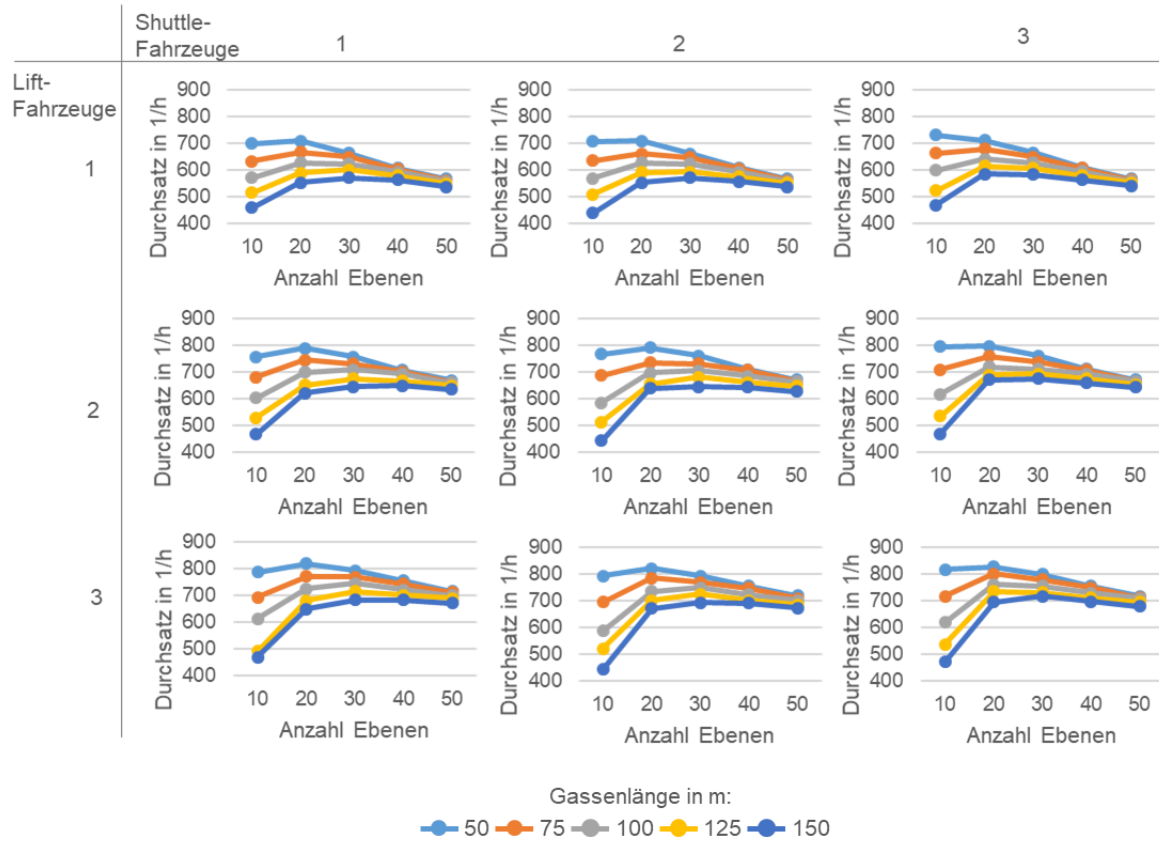


Abbildung 7-1: Durchsatzänderung unter Variation der Dimensionen (Blockreservierung)

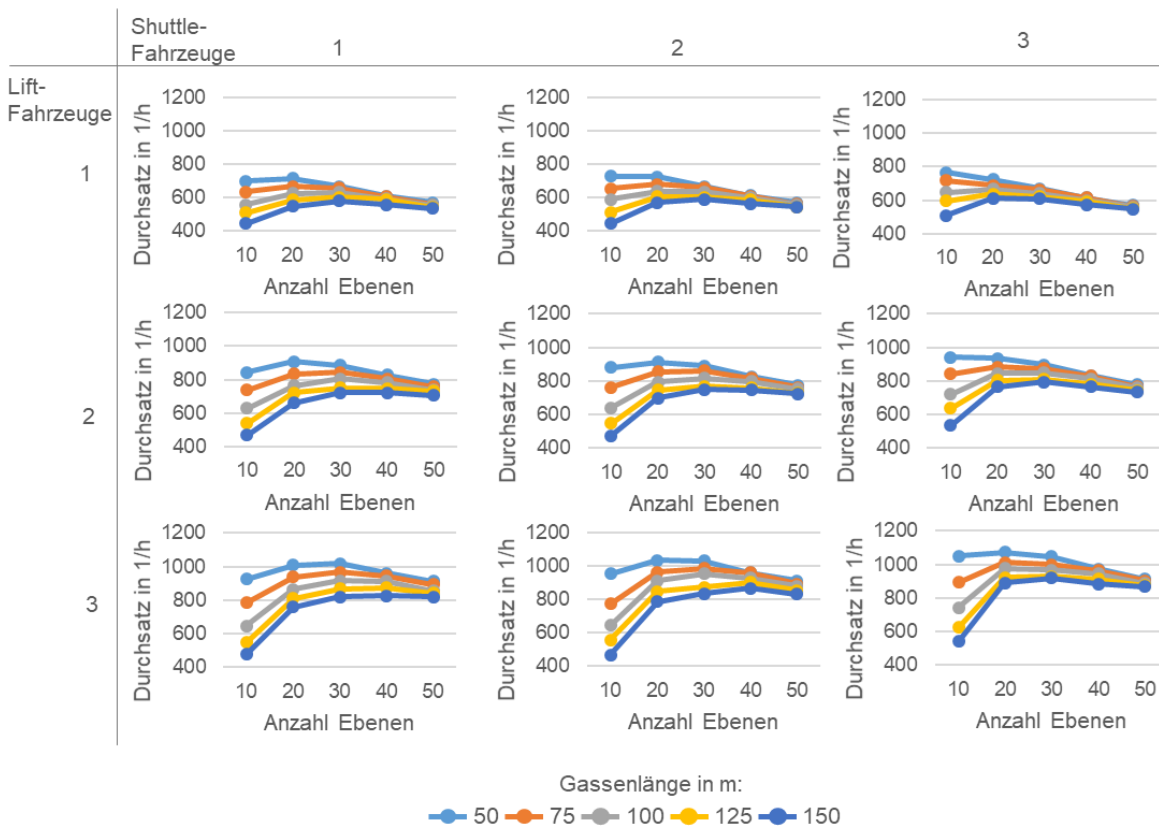


Abbildung 7-2: Durchsatzänderung unter Variation der Dimensionen (Abstandsregelung)

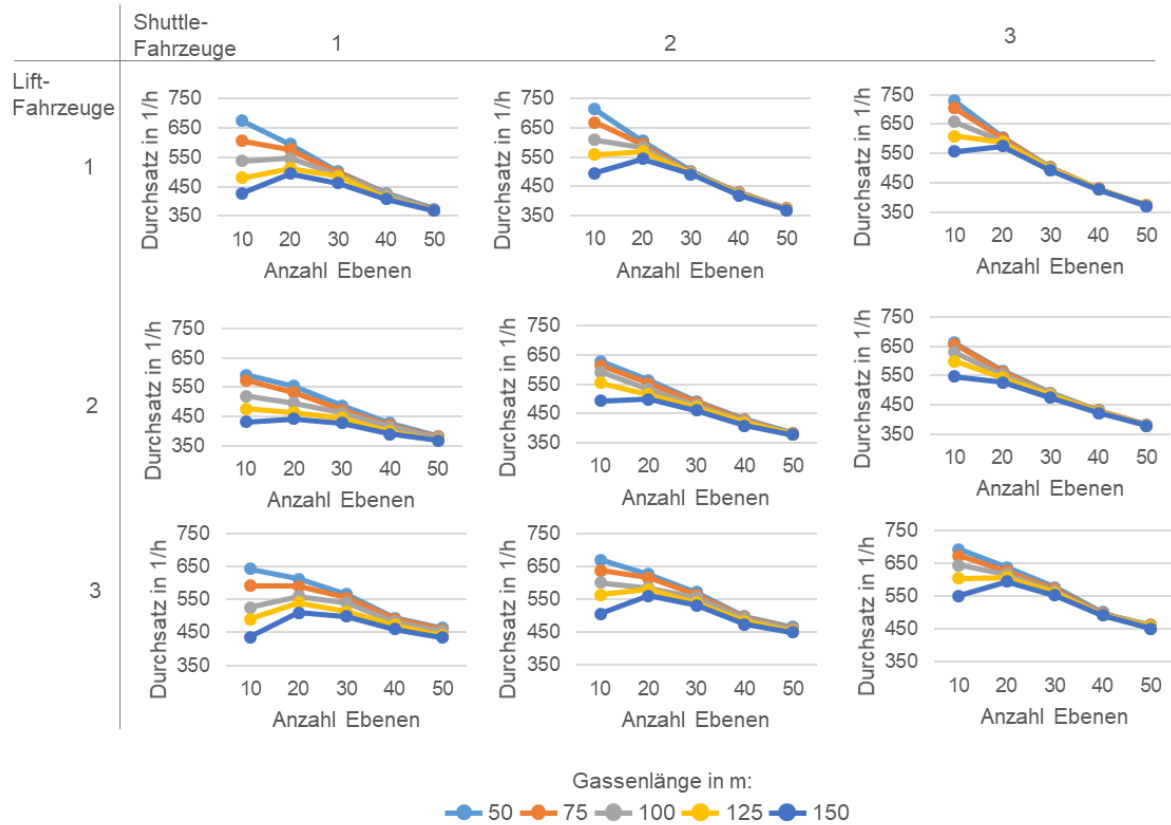


Abbildung 7-3: Durchsatzänderung unter Variation der Dimensionen (ortsbeschränkte Vergabe)

## 7.2 Leistungssteigerung unter Variation der Fahrzeuganzahl

Anschließend erfolgt die Untersuchung der Leistungssteigerung unter Variation der Fahrzeuganzahl für eine ausgewählte Dimension. Hierdurch lässt sich auf Basis der geforderten Durchsatzleistung schließlich die optimale Anzahl an Lift- und Shuttle-Fahrzeugen ableiten. Abbildung 7-4, Abbildung 7-5 und Abbildung 7-6 zeigen die Leistungssteigerungen exemplarisch für die untersuchten Konfigurationen unter Anwendung der jeweiligen Steuerung auf Basis der Anzahl eingesetzter Lift- und Shuttle-Fahrzeuge.

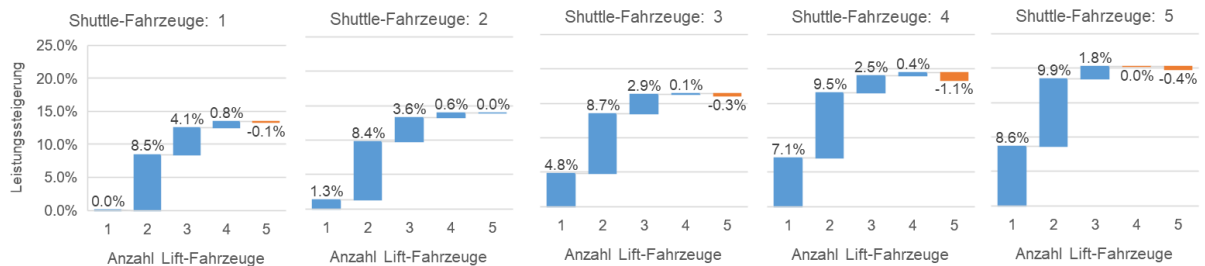


Abbildung 7-4: Leistungssteigerung unter Variation der Fahrzeuganzahl (Blockreservierung)

## 7 Ableitung von Handlungsempfehlungen

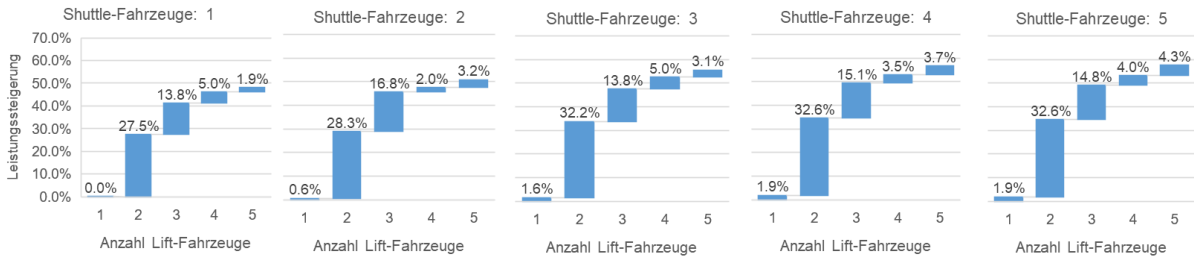


Abbildung 7-5: Leistungssteigerung unter Variation der Fahrzeuganzahl (Abstandsregelung)

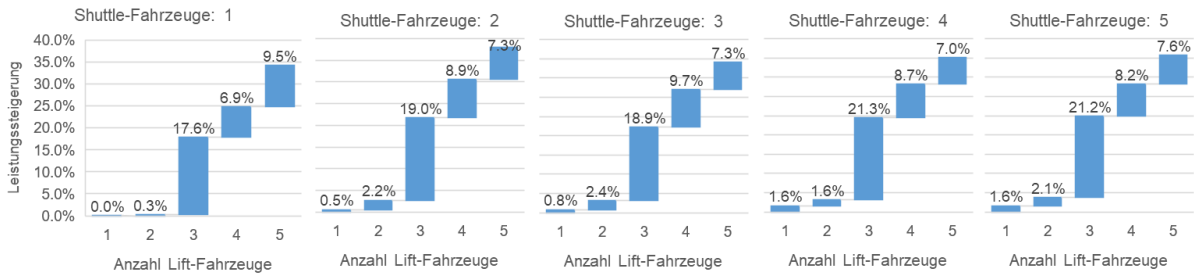


Abbildung 7-6: Leistungssteigerung unter Variation der Fahrzeuganzahl (ortsbeschränkte Vergabe)

## 8 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

---

In diesem Kapitel werden die erzielten Forschungsergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf 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 solche Systeme anforderungsgerecht dimensioniert werden können. Dies ermöglicht die optimale Konfiguration im Rahmen der Auslegung dieser neuen Variante von Shuttle-Systemen. Zunächst wurde dazu eine strukturierte Literaturrecherche zum Stand der Forschung im Bereich der Auslegung und Steuerung von Shuttle- sowie Multi-Server-Systemen durchgeführt. Zudem wurden Expertenbefragungen durchgeführt, 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 Systemvariante im Hochleistungsbereich darstellen können.

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

Zur Steuerung von Multi-Server-Shuttle-Systeme wurden Strategien entworfen und in Auftragsvergabe, -zuordnung und -ausführung kategorisiert und in Form von Flussdiagrammen dokumentiert. Dies ermöglicht eine individuelle Steuerungsauswahl je Anwendung und erlaubt somit eine zielgerichtete Auslegung.

Zur Einbindung der Steuerungsstrategien sowie zur Durchsatzanalyse unterschiedlicher Systemausprägungen wurden die Komponenten und Prozesse 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 mithilfe des angewandten Experimentdesigns ermittelt und simuliert. Im Zuge dessen konnte gezeigt werden, dass Multi-Server-Shuttle-Systeme gegenüber herkömmlichen Shuttle-Systemen eine Steigerung der Durchsatzleistung verzeichnen können.

Auf Basis der durchgeführten Parameterstudien wurden Handlungsanweisungen zur Systemkonfiguration in Form von Durchsatz-Kennlinien abgeleitet. Diese können als Richtwerte für die Auslegung herangezogen werden und dienen somit als Unterstützung in der Planungsphase zur optimalen 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 Systemausprägung 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 Anwendungen im Hochleistungsbereich erlaubt.

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 Verwendung der zugewendeten Mittel

#### Wissenschaftlich-technisches Personal und studentische Hilfskräfte (Einzelansatz A.1 und A.3 des Finanzierungsplans):

Um die geforderten Forschungsinhalte zur Entwicklung von Steuerungsstrategien für Multi-Server-Shuttle-Systeme sowie zur Erstellung eines simulationsbasierten Softwaretools für die Auslegung solcher Systeme zu erarbeiten, bedurfte es in den sieben definierten Arbeitspaketen eines wissenschaftlichen Mitarbeiters mit qualifizierter akademischer Ausbildung. Infolgedessen wurde ein Mitarbeiter der Einstufung nach TV-L 13 mit der Bearbeitung des Forschungsvorhabens beauftragt. Zur Unterstützung für sich wiederholende Tätigkeiten und Routinearbeiten auf Weisung wurden während der gesamten Projektlaufzeit studentische Hilfskräfte eingesetzt. In Abbildung 8-1 ist der Einsatz des wissenschaftlich-technischen Personals sowie der studentischen Hilfskräfte in den jeweiligen Arbeitspaketen dargestellt.

	Arbeitspaket	2018			2019				2020			Personaleinsatz (PM)	
		Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Wiss. MA	Stud. HK
AP 1	Stand der Technik von Shuttle- und Multi-Server-Systemen	■										3	2.5
AP 2	Identifikation von Systemausprägungen und deren Auswirkungen auf die zu entwickelnden Steuerungsstrategien		■									2	1
AP 3	Entwicklung von Steuerungsstrategien		■	■	■	■						8	5
AP 4	Modellierung und Implementierung eines Simulationsmodells					■	■	■				7	4.5
AP 5	Parameterstudien zur Untersuchung der Forschungshypothese							■	■	■		5	4.5
AP 6	Ableiten von Handlungsempfehlungen									■	■	3	1.5
AP 7	Dokumentation und Transfer der Ergebnisse in die Praxis	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	2	1
<b>Summe</b>											<b>30</b>	<b>20</b>	

Abbildung 8-1: Einsatz des wissenschaftlich-technischen Personals im Forschungsvorhaben

Es wurden ein wissenschaftlicher Mitarbeiter (wissenschaftlich-technisches Personal, Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) im Umfang von 30 Personenmonaten sowie studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte im Umfang von 20 Personenmonaten (mit 20 Stunden pro Woche) eingesetzt. Bedingt durch den hohen Arbeitsaufwand bei der Entwicklung und Umsetzung einer Vielzahl von Steuerungsstrategien sowie deren Auswertungen in den Simulationsstudien war ein verstärkter Einsatz von studentischen und wissenschaftlichen Hilfskräften notwendig. Der bewilligte Budgetrahmen wurde nicht überschritten.

#### Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans):

Geräte wurden für das Vorhaben nicht beantragt.

**Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans):**

Leistungen Dritter wurden für das Vorhaben nicht beantragt

## **8.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Notwendigkeit der geleisteten Arbeit resultiert aus der Forschungslücke, die aus dem aktuellen Stand der Forschung und Entwicklung abgeleitet und durch die Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses bestätigt wurde. Der Trend zu steigender Dynamik automatisierter Lagersysteme betont die deutliche Praxisrelevanz des Forschungsthemas. Denn die im Forschungsprojekt erarbeiteten Ergebnisse zeigen, dass durch die Anwendung geeigneter Steuerungsstrategien Multi-Server-Shuttle-Systeme robust und effizient betrieben werden können. Demnach erlaubt diese neue Ausprägung von Shuttle-Systemen höhere Durchsätze und ermöglicht somit Anwendungen im Bereich hoher Leistungsanforderungen. Durch die Entwicklung eines simulationsbasierten Softwaretools, in welches die erarbeiteten Steuerungsstrategien eingebunden worden sind, können Multi-Server-Shuttle-Systeme insbesondere von KMU anforderungsgerecht ausgelegt und optimal konfiguriert werden.

Art und Umfang der geleisteten Arbeiten ergeben sich aus der Anwendung geeigneter wissenschaftlicher Methoden und der Durchführung von Expertengesprächen in angemessener Weise. Die Ausführung der Forschungsarbeiten erfolgte durch wissenschaftliche Mitarbeiter, die durch studentische Hilfskräfte unterstützt wurden. Die geleisteten Arbeiten entsprechen dem begutachteten und bewilligten Forschungsantrag und waren daher für die Bearbeitung des Forschungsvorhabens notwendig und angemessen.

## **8.5 Ergebnistransfer in die Wirtschaft**

Zur Sicherstellung des Ergebnistransfers in die Wirtschaft, wurden die geplanten Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit in vollem Umfang umgesetzt. Die geplanten Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit befinden sich ebenfalls in der Umsetzung.

### **8.5.1 Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit**

In Tabelle 8-1 zeigt die Transfermaßnahmen, die während der Projektlaufzeit stattgefunden haben.

Tabelle 8-1: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Ziel	Rahmen	Zeitraum
<b>Maßnahme A: Projektbegleitender Ausschuss PA</b>		
Fortlaufende Diskussion und Abstimmung des Forschungsfortschrittes mit Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschuss (PA)	<b>A1</b> Vorstellung des Projekts und Diskussion der geplanten Arbeiten	Durchgeführt am 15.06.2018
	<b>A2</b> Vorstellung der ersten entwickelten Steuerungsstrategien; Diskussion des weiteren Vorgehens	Durchgeführt am 06.03.2019
	<b>A3</b> Vorstellung des Softwaretools und inhaltliche Diskussion der bevorstehenden Parameterstudien	Durchgeführt am 28.01.2020
	<b>A4</b> Vorstellung der Ergebnisse der Parameterstudien; inhaltliche Diskussion	Durchgeführt am 25.09.2020
<b>Maßnahme B: Präsentation auf Kongressen und Konferenzen</b>		
Präsentation von Ergebnissen des Projekts auf Fachtagungen vor Industrie und Wirtschaft	<b>B1</b> Bspw. 28. Deutscher Materialflusskongress	Durchgeführt am 26.07.2019 (Präsentation auf der <i>9th International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences</i> )
	<b>B2</b> Bspw. European Conference on Modeling and Simulation (ECMS)	Durchgeführt am 20.09.2019 (Präsentation auf der <i>18. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik</i> )
	<b>B3</b> Bspw. 15. WGTL-Fachkolloquium	Durchgeführt am 31.10.2019 (Präsentation auf dem <i>12th International Workshop on Applied Modeling &amp; Simulation</i> )
<b>Maßnahme C: Elektronischer Newsletter und Internetauftritt</b>		
Elektronische Verbreitung der Forschungsinhalte und -ergebnisse, Gewinn weiterer interessierter Unternehmen	<b>C1</b> Das Projekt wird im Newsletter des fml angesiedelten Logistik-Innovations-Zentrums (liz) vorgestellt	Durchgeführt im November 2018 (liz-Newsletter Ausgabe 2018)
	<b>C2</b> Ergebnistransfer über den liz-Newsletter	Durchgeführt im Dezember 2019 (liz-Newsletter Ausgabe 2019)
	<b>C3</b> Frei zugänglicher Internetauftritt des Forschungsvorhabens über die Homepage des fml	Online ( <a href="https://www.mw.tum.de/fml/forschung/2020/optimuss-optimale-konfiguration-von-multi-server-shuttle-systemen">https://www.mw.tum.de/fml/forschung/2020/optimuss-optimale-konfiguration-von-multi-server-shuttle-systemen</a> )
<b>Maßnahme D: Veröffentlichungen</b>		
Ergebnistransfer in die Wirtschaft	<b>D1</b> Publikation in einschlägigen Fachzeitschriften wie „Logistik für Unternehmen“	Veröffentlicht in „Logistik für Unternehmen“ im Juni 2018 (Ausgabe 6/2018 Seite 34/35)



Ziel	Rahmen	Zeitraum
	men“, „Logistik Heute“, „ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb“ o.ä.	Veröffentlicht im Tagungsband der Arbeitsgemeinschaft Simulation in Produktion und Logistik im September 2019
<b>Maßnahme E: Übernahme in die Lehre</b>		
Einbringung der erarbeiteten Ergebnisse in den Lehrbetrieb	<b>E1</b> Mitarbeit studentischer Hilfskräfte <b>E2</b> Anfertigung von Studienarbeiten (Semester-, Bachelor- und Masterarbeiten) im Rahmen des Projekts	Einsatz seit April 2018 Sieben Studienarbeiten (drei Bachelorarbeiten, zwei Semesterarbeiten, zwei Masterarbeiten) betreut
<b>Maßnahme F: liz-Logistik-Innovations-Zentrum München</b>		
Ergebnistransfer in die Wirtschaft	<b>F1</b> Vortrag, Posterpräsentation oder Vorführung im Rahmen des jährlich stattfindenden liz-Logistik-Seminars TUM	Durchgeführt am 21.03.2019 (Posterpräsentation auf dem 28. Deutschen Materialflusskongress)

Die durchgeführten Maßnahmen sind nachfolgend – in chronologischer Reihenfolge und nach Jahren sortiert – detailliert dargestellt.

Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit im Jahr 2018:

- Maßnahme A1:** Erstes Treffen des projektbegleitenden Ausschusses zur Vorstellung des Projekts und Diskussion der geplanten Arbeiten am 15.06.2018
- Maßnahme C1:** Projektvorstellung im Newsletter des am fml angesiedelten Logistik-Innovations-Zentrums (liz) liz-Newsletter Ausgabe 2018
- Maßnahme D1:** Veröffentlichung in der Fachzeitschrift „Logistik für Unternehmen“ Ausgabe 6/2018 Seite 34/35 "Leistungsschub für Shuttle-Systeme"
- Maßnahme E1:** Während der Projektlaufzeit in 2018 unterstützten studentische Hilfskräfte die folgenden projektbezogenen Aufgabenstellungen:
- Stand der Forschung zur Auslegung und Steuerung von Shuttle-Systemen und anderen Multi-Server-Systemen (Literaturrecherche)
  - Berechnung von Lagerwahrscheinlichkeiten in mehrfachtiefen Shuttle-Lagersystemen (Programmierung mit Python)
  - Lösungsansatz für das Scheduling-Problem mithilfe von Google OR (Literaturrecherche)

- Maßnahme E2:** Im Rahmen des Projektes wurden 2018 die folgenden Studienarbeiten betreut:
- Entwicklung und Umsetzung eines modularen Konzepts zur Modellierung und Simulation von Shuttle-Systemen
  - Entwicklung und Umsetzung von Strategien zur Steuerung mehrerer Lift-Fahrzeuge in einem Schacht
  - Entwicklung und Umsetzung von Strategien zur Steuerung von mehreren Shuttle-Fahrzeugen pro Gasse bei mehrfachtiefer Lagerung

Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit im Jahr 2019:

- Maßnahme A2:** Zweites Treffen des projektbegleitenden Ausschusses zur Vorstellung der ersten Ergebnisse zu den entwickelten Steuerungsstrategien und zur Diskussion des weiteren Vorgehens am 06.03.2019
- Maßnahme B1:** Vortrag und Veröffentlichung von Projektergebnissen auf der *9th International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS 2019)* am 26.07.2019
- Maßnahme B2:** Vortrag und Veröffentlichung von Projektergebnissen auf der *18. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik (ASIM 2019)* am 20.09.2019
- Maßnahme B3:** Vortrag und Veröffentlichung von Projektergebnissen auf dem *12th International Workshop on Applied Modeling & Simulation (WAMS 2019)* am 31.10.2019
- Maßnahme C2:** Transfer von Projektergebnissen über den Newsletter des am fml angesiedelten Logistik-Innovations-Zentrums (liz) im Dezember 2019
- Maßnahme C3:** Aktualisierung der Projektbeschreibung, in deutscher und englischer Sprache, auf der Homepage des Lehrstuhls fml
- Maßnahme D1:** Veröffentlichung im Tagungsband der Arbeitsgemeinschaft Simulation in Produktion und Logistik im September 2019
- Maßnahme E1:** Während der Projektlaufzeit in 2019 unterstützten studentische Hilfskräfte die folgenden projektbezogenen Aufgabenstellungen:
- Abstrakte Modellbildung einer Gassenebene und Implementierung einer optimalen Zuweisungsstrategie
  - Vorarbeit (mathematische Berechnung und Modellierung) zur Umsetzung einer Abstandsregelung von Lift-Fahrzeugen im Simulationsmodell
- Maßnahme E2:** Im Rahmen des Projektes wurden 2019 die folgenden Studienarbeiten betreut:

- Entwicklung und simulative Bewertung von Optimierungsalgorithmen für den Vertikaltransport in Hochleistungs-Shuttle-Systemen
- Entwicklung und Umsetzung von Reservierungsstrategien für Fahrzeuge in Hochleistungs-Shuttle-Systemen auf Basis logischer Blockierungen
- Entwicklung und Umsetzung einer Abstandsregelung für Fahrzeuge in Shuttle-Systemen

**Maßnahme F1:** Vorstellung des Projekts im Rahmen einer Posterpräsentation auf dem 28. Deutschen Materialflusskongress am 21.03.2019 (Iz-Logistik-Seminar fand in 2019 nicht statt)

Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit im Jahr 2020:

**Maßnahme A3:** Drittes Treffen des projektbegleitenden Ausschusses zur Vorstellung des Softwaretools und inhaltliche Diskussion der bevorstehenden Parameterstudien am 28.01.2020

**Maßnahme A4:** Viertes Treffen des projektbegleitenden Ausschusses zur Vorstellung und inhaltliche Diskussion der Ergebnisse der Parameterstudien am 25.09.2020

**Maßnahme E1:** Während der Projektlaufzeit in 2020 unterstützten studentische Hilfskräfte die folgenden projektbezogenen Aufgabenstellungen:

- Entwicklung und Umsetzung von Prioritätsregeln zur Auftragszuweisung von Fahrzeugen in Multi-Server-Shuttle-Systemen

**Maßnahme E2:** Im Rahmen des Projektes wurde 2020 die folgende Studienarbeit betreut:

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

### 8.5.2 Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Die in Tabelle 8-2 beschriebenen Transfermaßnahmen sind nach der Projektlaufzeit geplant und sind zum Teil bereits umgesetzt.

Tabelle 8-2: Geplante Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Ziel	Rahmen	Zeitraum
<b>Maßnahme H: Beratung</b>		

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Ergebnistransfer an Unternehmen ohne eigene Forschungsaktivitäten	<b>H1</b> Transfer der Forschungsergebnisse durch Seminare, in denen die erarbeiteten Inhalte praxisorientiert vermittelt werden.	Durchgeführt im Dezember 2020 (SNE Special Issue, Simulation in Production and Logistics)  Weitere geplant für I./II. Quartal 2021
	<b>H2</b> Unterstützung von Unternehmen bei der eigenständigen Anwendung der Ergebnisse durch das Angebot von Inhouse-Seminaren oder Beratungsleistungen	Durchgeführt mit Fa. Jungheinrich Logistiksysteme am 17.06.2020 (Skype-Besprechung)  Weitere geplant ab III. Quartal 2020
<b>Maßnahme I: Veröffentlichungen</b>		
Ergebnistransfer in die Wirtschaft	<b>I1</b> Veröffentlichung des Abschlussberichts auf den Homepages der Bundesvereinigung Logistik (BVL) und des Lehrstuhls fml	Geplant für I. Quartal 2021
	<b>I2</b> Publikation der Ergebnisse in Fachzeitschriften wie bspw. der „ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb“, „Logistik Heute“, o.ä.	Demnächst durchgeführt in Fachzeitschrift „f+h“ Heft 3/2021  Weitere geplant für I./II. Quartal 2021
	<b>I3</b> Ergebnisse und Planungskonzept werden bei Lehrstuhlbesichtigungen bzw. öffentlichen Workshops der Wirtschaft vorgeführt.	Durchgeführt im Oktober 2020 (fml-Newsletter Ausgabe 2020)  Weitere geplant ab III. Quartal 2020
<b>Maßnahme J: Konzepttransfer</b>		
Möglichkeit der Nutzung der Ergebnisse	<b>J1</b> Das entwickelte Konzept inkl. Demonstrator steht allen Interessierten diskriminierungsfrei zur Begutachtung bereit	Durchgeführt seit III. Quartal 2020

### 8.5.3 Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts

Durch die folgenden geplanten Maßnahmen nach der Projektlaufzeit ist ein Transfer der im Forschungsprojekt OptiMUSS erzielten Ergebnisse sichergestellt.

- Maßnahme H1: Am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) werden die Forschungsergebnisse interessierten Unternehmen in Seminaren vermittelt. Als Grundlage wurden die zentralen Ergebnisse im offiziellen Journal der EUROSIM „Simulation Notes Europe“ veröffentlicht (Dezember 2020).
- Maßnahme H2: Im Rahmen von Beratungsleistungen werden Unternehmen bei der Anwendung der Ergebnisse unterstützt. Im Rahmen einer Skype-Besprechung erfolgte bereits ein Austausch mit der Fa. Jungheinrich Logistiksysteme am 17.06.2020.
- Maßnahme I1: Der Abschlussbericht ist über die Homepages der BVL und des Lehrstuhls fml öffentlich zugänglich.
- Maßnahme I2: Über die weiterführende dissertationsrelevante Forschungsarbeit im Themenbereich ist eine fortlaufende Publikation in Fachzeitschriften sichergestellt. So erscheint ein Beitrag zu den Projektergebnissen in Heft 3/2021 der Zeitschrift f+h.
- Maßnahme I3: Durch Integration in den Simulationsdemonstrator des Lehrstuhls fml werden die Projektergebnisse (Konzept und Simulation) bei zukünftigen Lehrstuhlbesichtigungen vorgeführt. Bisher erfolgte der Ergebnistransfer über den lehrstuhleigenen Newsletter im Oktober 2020 (Ausgabe 2020).
- Maßnahme J1: Konzept und Softwaredemonstrator stehen zur Begutachtung bereit, um die Forschungsergebnisse übertragen und nutzen zu können.

## 8.6 Durchführende Forschungsstelle

### **Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)**

Der Lehrstuhl fml versteht sich als offene Forschungseinrichtung, die wesentlich zum wissenschaftlichen Fortschritt auf den Gebieten der Materialflusstechnik und Logistik beitragen will. Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse sowie deren Praxistransfer, insbesondere auch an kleine und mittlere Unternehmen (KMU), wird somit ein wichtiger Beitrag zur Sicherung des Logistikstandortes Deutschland geleistet. Als wesentliche Forschungsinhalte werden neben Aspekten der Technischen Logistik die Steuerung und Optimierung von Materialflussprozessen durch innovative Ident-Technologien (RFID), die Weiterentwicklung der Logistikplanung auf Basis digitaler Werkzeuge sowie die Rolle des Menschen in der Logistik behandelt.

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)	
<b>Anschrift</b>	Boltzmannstraße 15, 85748 Garching
<b>Leiter der Forschungsstelle</b>	Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
<b>Projektleitung</b>	Andreas Habl, M. Sc.
<b>Kontakt</b>	Tel.: 089/289-15957, <a href="http://www.mw.tum.de/fml">www.mw.tum.de/fml</a>

## 8.7 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.

## 8.8 Ausblick

Die im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeiteten Ergebnisse zeigen, dass sich Multi-Server-Shuttle-Systeme robust und effizient betreiben lassen und 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 eines Shuttle-Systems. Doch gegenüber herkömmlichen Shuttle-Systemen weisen Multi-Server-Shuttle-Systeme eine gesteigerte Durchsatzleistung auf. Daher sollte untersucht werden, inwieweit sich sequenzierte Auslagerströme auf den Durchsatz von Multi-Server-Shuttle-Systeme auswirkt.

Darüber hinaus erfolgt im aktuellen Simulationsmodell die Lagerbelegung und Auftragsvergabe zufallsbasiert. Um einen realen Lagerbetrieb abzubilden und damit zur Verbesserung der Praxisauglichkeit beizutragen, sollten im nächsten Schritt Lagerbelegungsstrategien umgesetzt werden und ihre Auswirkung auf die erzielbare Durchsatzleistung

untersucht werden. In einer weiterführenden Evaluation sollten Multi-Server-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.

## 9 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]





## 10 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 Shuttle und Lift-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: Zuordnung der Arbeitspakete zu den Kapiteln des Schlussberichts	5
Abbildung 2-1: Lagergasse eines Shuttle-Systems mit 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 3-1: Abhängigkeitsbeziehungen der Freiheitsgrade	20
Abbildung 4-1: Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen	21
Abbildung 4-2: Funktionsbeschränkte Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen	22
Abbildung 4-3: Ortsbeschränkte Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen	23
Abbildung 4-4: Unbeschränkte Auftragsvergabe in Multi-Server-Shuttle-Systemen	23
Abbildung 4-5: Auftragszuordnung in Multi-Server-Shuttle-Systemen	24
Abbildung 4-6: Auftragszuordnung in Multi-Server-Shuttle-Systemen	27
Abbildung 4-7: Ausführungssteuerung mittels Blockreservierung	27
Abbildung 4-8: Ausführungssteuerung mittels Abstandsregelung	28
Abbildung 5-1: Modularer Aufbau eines Shuttle-Systems	29

Abbildung 5-2: Modellierung einer Ebene in einem Shuttle-System	30
Abbildung 5-3: Modellierung eines Lifts in einem Shuttle-System	30
Abbildung 5-4: v-t-Diagramm einer Trapez- und Dreiecksfahrt für $a_{acc} = a_{dec}$	31
Abbildung 5-5: Einlagerungsprozess einer Transporteinheit	32
Abbildung 5-6: Auslagerungsprozess einer Transporteinheit	32
Abbildung 5-7: Umlagerungsprozess einer Transporteinheit	33
Abbildung 5-8: Funktionsmodule des Simulationsmodells	33
Abbildung 5-9: Simulationsmodell eines Multi-Server-Shuttle-Systems mit zehn Ebenen	35
Abbildung 5-10: Simulationsmodell eines Multi-Server-Shuttle-Systems mit zwei Liften	36
Abbildung 5-11: Auftragsdurchführung im Multi-Server-Shuttle-System	37
Abbildung 6-1: Abweichung der Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Simulationszeit und Fahrzeuganzahl (Referenz: 10 h)	41
Abbildung 6-2: Identifikation der Warm-Up Phase über die Anzahl abgeschlossener Aufträge je Minute	41
Abbildung 6-3: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Anzahl an Ebenen in der Gasse	42
Abbildung 6-4: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Anzahl an Ebenen und Shuttle-Fahrzeuge	43
Abbildung 6-5: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Anzahl an Ebenen und Lift-Fahrzeuge	43
Abbildung 6-6: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Anzahl an Ebenen und Fahrzeugpaare (Lift/Shuttle)	44
Abbildung 6-7: Erstellung des Testplans	44
Abbildung 6-8: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Konfiguration	46
Abbildung 6-9: Durchschnittliche Änderung der Durchsatzleistung	46
Abbildung 6-10: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Vergabestrategie	47
Abbildung 6-11: Durchsatzleistung anhand Vergabestrategie „funktionsbeschränkt“ und alternierender Erhöhung der Fahrzeugzahl	47
Abbildung 6-12: Durchsatzleistung anhand Vergabestrategie „funktionsbeschränkt“ und gleichmäßiger Erhöhung der Fahrzeugzahl	47
Abbildung 6-13: Durchsatzleistung anhand Vergabestrategie „ortsbeschränkt“	48
Abbildung 6-14: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Zuordnungsstrategie	48
Abbildung 6-15: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Prioritätsregel (fahrzeugbasiert)	49

---

Abbildung 6-16: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Prioritätsregel (auftragsbasiert)	49
Abbildung 6-17: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Prioritätsregel (auftragsbasiert, NV)	49
Abbildung 6-18: Durchsatzleistung in Abhängigkeit der Ausführungsstrategie	50
Abbildung 6-19: Durchlaufzeiten (DLZ) in Abhängigkeit der Ausführungsstrategie	50
Abbildung 7-1: Durchsatzänderung unter Variation der Dimensionen (Blockreservierung)	52
Abbildung 7-2: Durchsatzänderung unter Variation der Dimensionen (Abstandsregelung)	52
Abbildung 7-3: Durchsatzänderung unter Variation der Dimensionen (ortsbeschränkte Vergabe)	53
Abbildung 7-4: Leistungssteigerung unter Variation der Fahrzeuganzahl (Blockreservierung)	53
Abbildung 7-5: Leistungssteigerung unter Variation der Fahrzeuganzahl (Abstandsregelung)	54
Abbildung 7-6: Leistungssteigerung unter Variation der Fahrzeuganzahl (ortsbeschränkte Vergabe)	54
Abbildung 8-1: Einsatz des wissenschaftlich-technischen Personals im Forschungsvorhaben	57



## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 3-1:	Morphologischer Kasten der Dimensionierung von Multi-Server-Shuttle-Systemen	17
Tabelle 3-2:	Morphologischer Kasten der liftbezogenen Konfiguration je Gasse	18
Tabelle 3-3:	Morphologischer Kasten der ebenenbezogenen Konfiguration je Gasse	19
Tabelle 6-1:	Betrachtete Eingabe- und Ausgabeparameter	39
Tabelle 6-2:	Betrachtete Parameterräume der Einzelkonfigurationen	44
Tabelle 8-1:	Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	59
Tabelle 8-2:	Geplante Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	62



# 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. 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. Projekttreffen 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?